

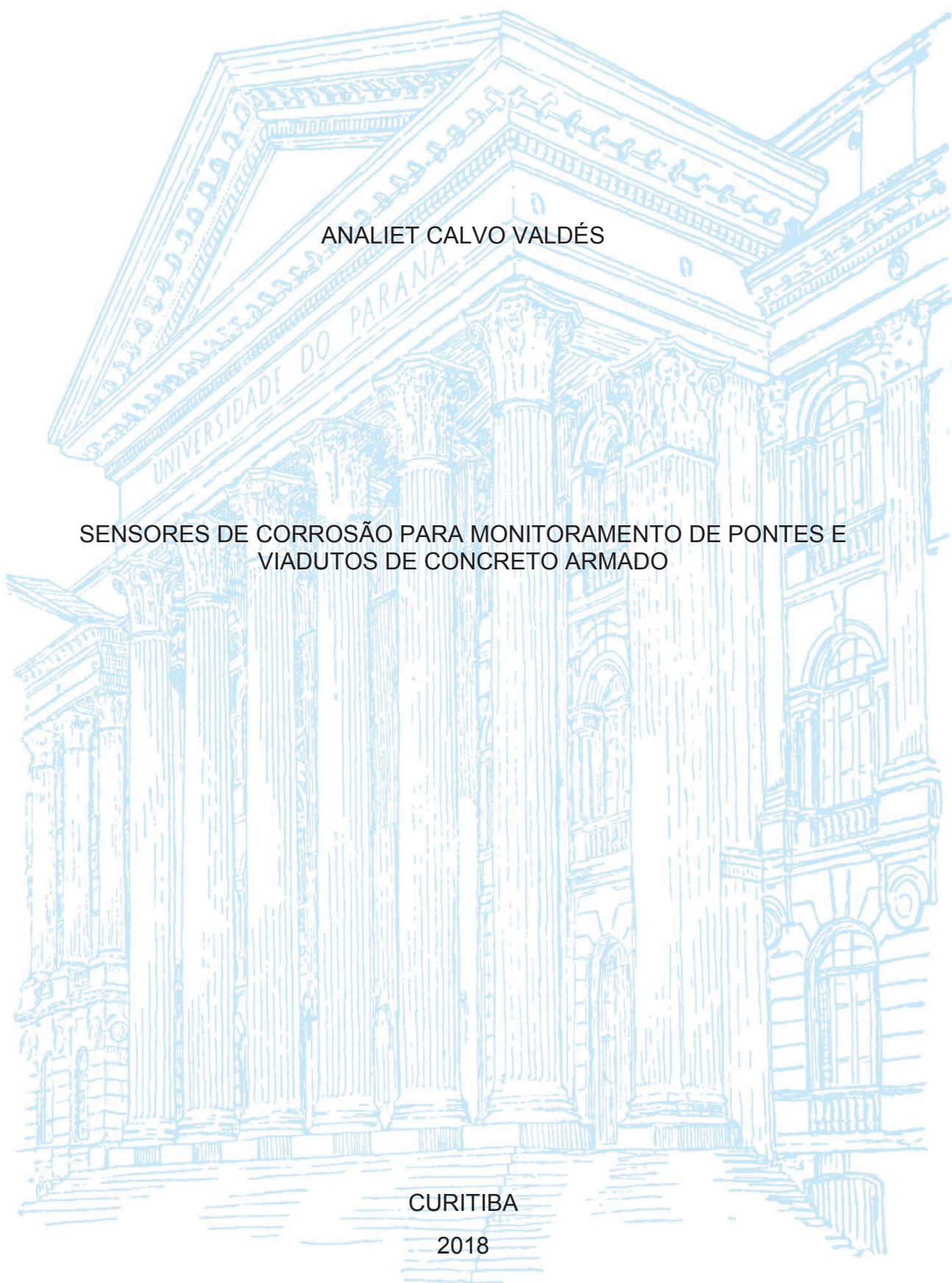
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANALIET CALVO VALDÉS

SENSORES DE CORROSÃO PARA MONITORAMENTO DE PONTES E
VIADUTOS DE CONCRETO ARMADO

CURITIBA

2018



ANALIET CALVO VALDÉS

SENSORES DE CORROSÃO PARA MONITORAMENTO DE PONTES E
VIADUTOS DE CONCRETO ARMADO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação de Engenharia de Construção Civil. Setor de Tecnologia. Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Henrique Faria de
Medeiros

CURITIBA

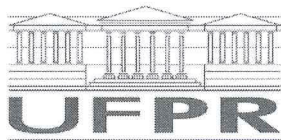
2018

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

- V145s Valdés, Analiet Calvo
 Sensores de corrosão para monitoramento de pontes e viadutos de concreto armado / Analiet Calvo Valdés – Curitiba, 2018.
 185 p. : il. [algumas color.] ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Construção Civil, 2018.
- Orientador: Marcelo Henrique Faria de Medeiros
 Bibliografia: p. 165-174.
1. Concreto armado - corrosão. 2. Monitoramento – sensor galvânico. 3. Corrente galvânica. I. Universidade Federal do Paraná. II. Medeiros, Marcelo Henrique Faria de. III. Título.

CDD: 624.183473

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
CONSTRUÇÃO CIVIL

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **ANALIET CALVO VALDÉS** intitulada: **SENSORES DE CORROSÃO PARA MONITORAMENTO DE PONTES E VIADUTOS DE CONCRETO ARMADO**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 11 de Abril de 2018.


MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

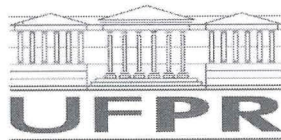

RONALDO ALVES DE MEDEIROS JUNIOR

Avaliador Interno (UFPR)



EDUARDO PEREIRA

Avaliador Externo (UEPG)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
CONSTRUÇÃO CIVIL

ATA Nº300

ATA DE SESSÃO PÚBLICA DE DEFESA DE MESTRADO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL

No dia onze de abril de dois mil e dezoito às 09:00 horas, na sala Sala de Vídeo Conferência, Centro de Estudos de Engenharia Civil (CESEC) - UFPR, foram instalados os trabalhos de arguição da mestranda **ANALIET CALVO VALDÊS** para a Defesa Pública de sua dissertação intitulada **SENSORES DE CORROSÃO PARA MONITORAMENTO DE PONTES E VIADUTOS DE CONCRETO ARMADO**. A Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL da Universidade Federal do Paraná, foi constituída pelos seguintes Membros: MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS (UFPR), RONALDO ALVES DE MEDEIROS JUNIOR (UFPR), EDUARDO PEREIRA (UEPG). Dando início à sessão, a presidência passou a palavra a discente, para que a mesma expusesse seu trabalho aos presentes. Em seguida, a presidência passou a palavra a cada um dos Examinadores, para suas respectivas arguições. A aluna respondeu a cada um dos arguidores. A presidência retomou a palavra para suas considerações finais. A Banca Examinadora, então, reuniu-se e, após a discussão de suas avaliações, decidiu-se pela APROVAÇÃO da aluna. A mestranda foi convidada a ingressar novamente na sala, bem como os demais assistentes, após o que a presidência fez a leitura do Parecer da Banca Examinadora. A aprovação no rito de defesa deverá ser homologada pelo Colegiado do programa, mediante o atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca dentro dos prazos regimentais do programa. A outorga do título de mestre está condicionada ao atendimento de todos os requisitos e prazos determinados no regimento do Programa de Pós-Graduação. Nada mais havendo a tratar a presidência deu por encerrada a sessão, da qual eu, MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS, lavrei a presente ata, que vai assinada por mim e pelos membros da Comissão Examinadora.

Curitiba, 11 de Abril de 2018.


MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


RONALDO ALVES DE MEDEIROS JUNIOR
Avaliador Interno (UFPR)


EDUARDO PEREIRA
Avaliador Externo (UEPG)

AGRADECIMENTOS

Um agradecimento especial ao professor Marcelo Henrique Farias de Medeiros pela orientação, disponibilidade e interesse, fundamentais para a realização do trabalho.

A Polyana de Jesus Roque, aluna de iniciação científica, pela sua ajuda.

Ao técnico do Laboratório Ricardo Cezar Volert por toda a assistência dada durante a realização dos ensaios, assim como a instalação e programação do adquiridor de dados.

A minha família por todo o incentivo dado nesses anos.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná (PPGECC/UFPR); à Fundação Araucária pela concessão da bolsa de estudo e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela aplicação de recurso para a compra dos equipamentos usados nesta pesquisa.

A Deus (Salmos 30:12).

RESUMO

O uso de sensores para monitoramento contínuo é atualmente uma vertente que tem assumido progressivamente grande importância na área da construção civil em procura de uma maior durabilidade e sustentabilidade do parque de obras de arte da infraestrutura pública. Os sensores de corrosão se baseiam na identificação prematura da variação de grandezas vinculadas à corrosão como o potencial de corrosão ou corrente galvânica. Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi avaliar a eficácia de um sensor galvânico de múltiplos eletrodos confeccionado nos laboratórios do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná, com materiais brasileiros e padrões semelhantes aos equipamentos importados. O programa experimental teve duas etapas. Na primeira etapa foi avaliado o desempenho de dois sensores submersos em uma solução saturada de Ca(OH)_2 com e sem adição de NaCl (3,5% em massa). Na segunda avaliou-se o comportamento de 16 sensores instalados em corpos de prova de concreto armado, que foram submetidos a uma série de ciclos de secagem e molhagem. Nessa etapa se correlacionaram leituras de potencial de corrosão (E_{corr}) obtidas por meio de um eletrodo de referência de cobre sulfato de cobre (Cu/CuSO_4) com as leituras de corrente galvânica (I_{gal}) e potencial galvânico (E_{par}) adquiridas através dos sensores. Em ambas etapas o valor de I_{gal} mostrou inércia elevada para identificar a presença de íons Cl^- no sistema. Enquanto que o E_{par} , durante a primeira etapa, passou a aumentar na faixa dos valores positivos uma vez que o sistema foi contaminado; na segunda etapa nem sempre esteve em concordância com os valores de E_{corr} que se mostraram confiáveis para detectar a despassivação do aço.

Palavras chaves: corrosão; monitoramento; sensor galvânico; corrente galvânica.

ABSTRACT

The use of sensors for continuous monitoring is nowadays an increasingly important aspect in the field of civil construction in search of greater durability and sustainability of the works of art of the public infrastructure. Corrosion sensors are based on the premature identification of the variation of corrosion-related quantities such as corrosion potential or galvanic current. In this context, the objective of this work was to evaluate the efficacy of a multi - electrode galvanic sensor made in the laboratories of the Civil Engineering course of the Federal University of Paraná, with Brazilian materials and standards like imported equipment. The experimental program had two steps. In the first step, the performance of two submerged sensors in a saturated solution of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ with and without addition of NaCl (3.5% by mass) was evaluated. The second one evaluated the behavior of 16 sensors installed in reinforced concrete specimens, which were submitted to a series of drying and wetting cycles. In this step, corrosion potential readings (E_{corr}) obtained by means of a reference copper copper sulfate electrode (Cu/CuSO_4) were correlated with the readings of galvanic current (I_{gal}) and galvanic potential (E_{par}) acquired through the sensors. In both steps the I_{gal} value showed high inertia to identify the presence of Cl^- ions in the system. While the E_{par} , during the first stage, began to increase in the range of positive values once the system was contaminated; in the second step was not always in agreement with the values of E_{corr} that proved reliable to detect the destabilization of the steel.

Keywords: corrosion; monitoring; galvanic sensor; galvanic current.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Pilha eletroquímica. Fonte: TORRES LUQUE et al. (2014).	30
Figura 2: Arranjo de escada de múltiplos anodos. Fonte: Mccarter e Vennesland (2004).	41
Figura 3: Processo de montagem do sensor. (a) Polimento com escova de fios de aço; (b) Imersos em álcool para posteriormente ser secos ao ar; (c) Solda das conexões elétricas; (d) e (e) Cobrimento das conexões elétricas com filme de PVC; (f) Montagem.	49
Figura 4: Sensor galvânico montado.	50
Figura 5: Esquema do corpo de prova prismático.	51
Figura 6: Profundidades dos ânodos no corpo de prova de concreto.	52
Figura 7: Moldagem dos corpos de prova prismáticos e instalação do sensor. (a) Instalação das barras de reforço; (b) Corpos de prova lubrificados com óleo; (c) Moldagem.	52
Figura 8: Curva granulométrica do agregado miúdo.	54
Figura 9: Curva granulométrica do agregado graúdo.	54
Figura 10: Teste para determinar o potencial do par (E_{par}).	58
Figura 11: Ensaio de corrente galvânica (ZRA).	59
Figura 12: Amostras prontas para os ensaios de EDS e MEV. (a) Barras do Sensor B; (b) Barras do Sensor A.	60
Figura 13: Primeiro conjunto de leituras do E_{par} . Sensor A sem Cl^-	66
Figura 14: Médias do primeiro conjunto de leituras do E_{par} . Sensor A sem Cl^-	66
Figura 15: Segundo conjunto de leituras do E_{par} . Sensor A sem Cl^-	67
Figura 16: Médias do segundo conjunto de leituras do E_{par} . Sensor A sem Cl^-	68
Figura 17: Terceiro conjunto de leituras do E_{par} . Sensor A com Cl^-	69
Figura 18: Médias do terceiro conjunto de leituras do E_{par} . Sensor A com Cl^-	69
Figura 19: Quarto conjunto de leituras do E_{par} . Sensor A com Cl^-	70
Figura 20: Médias do quarto conjunto de leituras do E_{par} . Sensor A com Cl^-	70
Figura 21: Quinto conjunto de leituras do E_{par} . Sensor A com Cl^-	71
Figura 22: Médias do quinto conjunto de leituras do E_{par} . Sensor A com Cl^-	71
Figura 23: Valor do pH da solução aquosa de $Ca(OH)_2$ ao longo do tempo.	72
Figura 24: Comportamento do potencial dos pares do Sensor A ao longo do tempo.	72
Figura 25: Primeiro conjunto de leituras do E_{par} . Sensor B sem Cl^-	73
Figura 26: Médias do primeiro conjunto de leituras do E_{par} . Sensor B sem Cl^-	73
Figura 27: Segundo conjunto de leituras do E_{par} . Sensor B sem Cl^-	74
Figura 28: Médias do segundo conjunto de leituras do E_{par} . Sensor B sem Cl^-	74
Figura 29: Terceiro conjunto de leituras do E_{par} . Sensor B com Cl^-	75
Figura 30: Médias do terceiro conjunto de leituras do E_{par} . Sensor B com Cl^-	75
Figura 31: Quarto conjunto de leituras do E_{par} . Sensor B com Cl^-	76
Figura 32: Médias do quarto conjunto de leituras do E_{par} . Sensor B com Cl^-	76
Figura 33: Quinto conjunto de leituras do E_{par} . Sensor B com Cl^-	77
Figura 34: Médias do quinto conjunto de leituras do E_{par} . Sensor B com Cl^-	77
Figura 35: Comportamento do potencial dos pares do Sensor B ao longo do tempo.	78
Figura 36: Primeiro conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor A sem Cl^-	79
Figura 37: Médias do primeiro conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor A sem Cl^-	79

Figura 38: Segundo conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor A sem Cl^-	80
Figura 39: Médias do segundo conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor A sem Cl^-	80
Figura 40: Terceiro conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor A com Cl^-	81
Figura 41: Médias do terceiro conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor A com Cl^-	81
Figura 42: Quarto conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor A com Cl^-	82
Figura 43: Médias do quarto conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor A com Cl^-	82
Figura 44: Quinto conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor A com Cl^-	83
Figura 45: Médias do quinto conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor A com Cl^-	83
Figura 46: Comportamento da corrente galvânica no Sensor A ao longo do tempo.....	84
Figura 47: Primeiro conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor B sem Cl^-	84
Figura 48: Médias do primeiro conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor B sem Cl^-	85
Figura 49: Segundo conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor B sem Cl^-	86
Figura 50: Médias do segundo conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor B sem Cl^-	86
Figura 51: Terceiro conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor B com Cl^-	87
Figura 52: Médias do terceiro conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor B com Cl^-	87
Figura 53: Valor do pH da solução aquosa de $Ca(OH)_2$ ao longo do tempo. Sensor B.	88
Figura 54: Quarto conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor B com Cl^-	90
Figura 55: Médias do quarto conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor B com Cl^-	90
Figura 56: Quinto conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor B.	91
Figura 57: Médias do quinto conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor B.....	91
Figura 58: Comportamento da corrente galvânica no Sensor B ao longo do tempo.....	92
Figura 59: Resistência à compressão média (fcm) em [MPa] aos 2 e 28 dias do Bloco I.	95
Figura 60: Resistência à compressão média (fcm) em [MPa] aos 28 e 91 dias do Bloco II.	95
Figura 61: Absorção de água por capilaridade dos traços 15 e 30 MPa do Bloco I, tempo de cura de 1 dia.....	96
Figura 62: Absorção de água por capilaridade dos traços 15 e 30 MPa do Bloco II, tempo de cura de 91 dias.....	96
Figura 63: Teores de umidade em [%] registrados nos corpos de prova do Bloco I (1 d) nos oito ciclos de imersão e secagem.	97
Figura 64: Teores de umidade em [%] registrados nos corpos de prova do Bloco II (91 d) nos oito ciclos de envelhecimento.	98
Figura 65: E_{corr} do P-I-15-B1 o qual esteve exposto a cloretos apenas no ciclo 6 dos oito ciclos de envelhecimento.....	100
Figura 66: E_{corr} do P-II-15-B1 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).	101
Figura 67: E_{corr} do P-III-15-B1 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).	101
Figura 68: E_{corr} do P-IV-15-B1 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).	102
Figura 69: E_{corr} do P-I-30-B1 o qual esteve exposto a cloretos apenas no ciclo 6 dos oito ciclos de envelhecimento.....	103
Figura 70: E_{corr} do P-II-30-B1 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).	104
Figura 71: E_{corr} do P-III-30-B1 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).	105

Figura 72: E_{corr} do P-IV-30-B1 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).	105
Figura 73: E_{corr} do P-I-15-B2 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).	106
Figura 74: E_{corr} do P-III-15-B2 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).	107
Figura 75: E_{corr} do P-IV-15-B2 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).	107
Figura 76: E_{corr} do P-I-30-B2 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).	108
Figura 77: E_{corr} do P-II-30-B2 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).	108
Figura 78: E_{corr} do P-III-30-B2 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).	109
Figura 79: E_{corr} do P-IV-30-B2 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).	109
Figura 80: Potencial dos pares no corpo de prova P-I-15-B1 o qual ficou exposto a cloretos só no ciclo 6.	111
Figura 81: Potencial dos pares no corpo de prova P-II-15-B1 (cloreto nos oito ciclos).	113
Figura 82: Potencial dos pares no corpo de prova P-III-15-B1 (cloreto nos oito ciclos).	113
Figura 83: Potencial dos pares no corpo de prova P-IV-15-B1 (cloreto nos oito ciclos).	113
Figura 84: Potencial dos pares no corpo de prova P-I-30-B1, exposto a cloretos só no começo do ciclo 6.....	114
Figura 85: Potencial dos pares no corpo de prova P-II-30-B1 (cloreto nos oito ciclos).	115
Figura 86: Potencial dos pares no corpo de prova P-III-30-B1 (cloreto nos oito ciclos).	116
Figura 87: Potencial dos pares no corpo de prova P-IV-30-B1 (cloreto nos oito ciclos).	116
Figura 88: Potencial dos pares no corpo de prova P-I-15-B2 (cloreto nos oito ciclos).	117
Figura 89: Potencial dos pares no corpo de prova P-III-15-B2 (cloreto nos oito ciclos).	118
Figura 90: Potencial dos pares no corpo de prova P-IV-15-B2 (cloreto nos oito ciclos).	118
Figura 91: Potencial dos pares no corpo de prova P-I-30-B2 (cloreto nos oito ciclos).	120
Figura 92: Potencial dos pares no corpo de prova P-II-30-B2 (cloreto nos oito ciclos).	120
Figura 93: Potencial dos pares no corpo de prova P-III-30-B2 (cloreto nos oito ciclos).	121
Figura 94: Potencial dos pares no corpo de prova P-IV-30-B2 (cloreto nos oito ciclos).	121
Figura 95: I_{gal} do P-I-15-B1 nos oito ciclos de envelhecimento.....	123
Figura 96: I_{gal} do P-II-15-B1 nos oito ciclos de envelhecimento.....	124
Figura 97: I_{gal} do P-III-15-B1 nos oito ciclos de envelhecimento.	124

Figura 98: I_{gal} do P-IV-15-B1 nos oito ciclos de envelhecimento.....	124
Figura 99: I_{gal} do P-I-30-B1 nos oito ciclos de envelhecimento.....	125
Figura 100: I_{gal} do P-II-30-B1 nos oito ciclos de envelhecimento.....	126
Figura 101: I_{gal} do P-III-30-B1 nos oito ciclos de envelhecimento.....	126
Figura 102: I_{gal} do P-IV-30-B1 nos oito ciclos de envelhecimento.....	127
Figura 103: I_{gal} do P-I-15-B2 nos oito ciclos de envelhecimento.....	128
Figura 104: I_{gal} do P-III-15-B2 nos oito ciclos de envelhecimento.....	128
Figura 105: I_{gal} do P-IV-15-B2 nos oito ciclos de envelhecimento.....	128
Figura 106: I_{gal} do P-I-30-B2 nos oito ciclos de envelhecimento.....	129
Figura 107: I_{gal} do P-II-30-B2 nos oito ciclos de envelhecimento.....	130
Figura 108: I_{gal} do P-III-30-B2 nos oito ciclos de envelhecimento.....	130
Figura 109: I_{gal} do P-IV-30-B2 nos oito ciclos de envelhecimento.....	130
Figura 110: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-I-15-B1.....	132
Figura 111: Resultado do ensaio colorimétrico no corpo de prova P-II-15-B1.....	133
Figura 112: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-III-15-B1.....	133
Figura 113: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-IV-15-B1.....	133
Figura 114: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-I-30-B1.....	134
Figura 115: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-II-30-B1.....	135
Figura 116: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-III-30-B1.....	135
Figura 117: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-IV-30-B1.....	135
Figura 118: Precipitação de produto de corrosão pelas faces laterais dos corpos de prova do Bloco II no ciclo 2 e nos ciclos seguintes.....	136
Figura 119: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-I-15-B2.....	137
Figura 120: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-III-15-B2.....	137
Figura 121: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-IV-15-B2.....	138
Figura 122: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-I-30-B2.....	138
Figura 123: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-II-30-B2.....	138
Figura 124: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-III-30-B2.....	139
Figura 125: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-IV-30-B2.....	139
Figura 126: Valores médios de potencial de corrosão e teor de umidade para os três corpos de prova do traço 15 MPa expostos a Cl^- nos oito ciclos.....	140
Figura 127: Valores médios de potencial de corrosão e teor de umidade para os três corpos de prova do traço 30 MPa expostos a Cl^- nos oito ciclos.....	141
Figura 128: Valores médios de potencial de corrosão e teor de umidade para os três corpos de prova do traço 15 MPa.....	142
Figura 129: Valores médios de potencial de corrosão e teor de umidade para os quatro corpos de prova do traço 30 MPa.....	142
Figura 130: Valores médios de potencial do par e teor de umidade para os três corpos de prova do traço 15 MPa expostos a Cl^- nos oito ciclos.....	143
Figura 131: Valores médios de potencial do par e teor de umidade para os três corpos de prova do traço 30 MPa expostos a Cl^- nos oito ciclos.....	144
Figura 132: Valores médios de potencial do par e teor de umidade para os três corpos de prova do traço 15 MPa.....	145
Figura 133: Valores médios de potencial do par e teor de umidade para os quatro corpos de prova do traço 30 MPa.....	146
Figura 134: Valores de teor de umidade e corrente galvânica médios obtidos nos ânodos embebidos no interior dos três corpos de prova do traço 15 MPa expostos a Cl^- nos oito ciclos.....	147

Figura 135: Valores de teor de umidade e corrente galvânica médios obtidos nos ânodos embebidos no interior dos três corpos de prova do traço 30 MPa expostos a Cl ⁻ nos oito ciclos.....	147
Figura 136: Valores de teor de umidade e corrente galvânica médios obtidos nos ânodos embebidos no interior dos três corpos de prova do traço 15 MPa.....	148
Figura 137: Valores de teor de umidade e corrente galvânica médios obtidos nos ânodos embebidos no interior dos quatro corpos de prova do traço 30 MPa.	148
Figura 138: Comportamento do teor de umidade dos quatro corpos de prova ao do traço 15 MPa ao longo do experimento.	149
Figura 139: Comportamento do teor de umidade dos quatro corpos de prova do traço 30 MPa ao longo do experimento.	150
Figura 140: Comportamento do teor de umidade dos três corpos de prova do traço 15 MPa ao longo do experimento.	151
Figura 141: Comportamento do teor de umidade dos três corpos de prova do traço 30 MPa ao longo do experimento.	151
Figura 142: Corpos de prova com cobrimento lateral pequeno.....	157
Figura 143: Estado da película de tinta epóxi nos corpos de prova do Bloco II.....	158
Figura 144: Micro-fissuras nos corpos de prova do Bloco I.	158

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relações para estimar a corrosão.	34
Tabela 2: Valores indicativos da condição do aço.	36
Tabela 3: Relação A_c/A_a	50
Tabela 4: Traços unitários usados para a moldagem dos corpos de prova.	53
Tabela 5: Propriedades físicas dos materiais.	53
Tabela 6: Peso inicial dos sensores.	57
Tabela 7: Corpos de prova prismáticos.	61
Tabela 8: Esquematização da primeira etapa.	65
Tabela 9: Profundidade da frente de penetração de cloretos nos corpos de prova do Bloco I _(1 d)	131
Tabela 10: Profundidade da frente de penetração de cloretos.	136
Tabela 11: Conclusão final sobre os parâmetros monitorados para detectar a corrosão.	162

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 HIPÓTESES	18
1.2 OBJETIVO	18
1.3 JUSTIFICATIVAS	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1. MONITORAMENTO DAS OAEs	22
2.1.1 Definição.....	23
2.1.2 Vantagens do monitoramento	24
2.1.3 Abordagens do monitoramento.....	25
2.1.4 Planejamento do sistema de monitoramento	26
2.1.5 Uso dos sensores em um sistema de monitoramento	28
2.2 CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO	29
2.3 TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS.....	32
2.3.1 Potencial de corrosão (E_{corr}).....	32
2.3.2 Corrente galvânica.....	35
2.4 SENSORES DE CORROSÃO.....	39
2.4.1 Sensor galvânico	40
2.4.2 Sensor de potencial de corrosão.....	46
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	48
3.1 ETAPAS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	48
3.1.1 Parâmetros fixados	48
3.1.2 Variáveis independentes.....	48
3.1.3 Variáveis dependentes.....	49
3.2 CONFIGURAÇÃO DO SENSOR.....	49
3.3 CORPOS DE PROVA DE CONCRETO.....	51
3.3.1 Características dos materiais	53
3.3.2 Armaduras de aço carbono e limpeza	55
3.3.3 Moldagem dos corpos de prova	55
3.3.4 Processo de envelhecimento acelerado.....	56
3.4 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO	57
3.4.1 Primeira etapa – testes em solução aquosa.....	57
3.4.2 Segunda etapa – teste em corpos de prova de concreto armado.	60
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
4.1 PRIMEIRA ETAPA – TESTES EM SOLUÇÃO AQUOSA.....	65
4.1.1 Teste do potencial do par (E_{par}).....	66
4.1.2 Teste de corrente galvânica (I_{gal}).....	78

4.1.3 Ensaio MEV e EDS	92
4.2 Segunda etapa – testes em corpos de prova de concreto armado.....	94
4.2.1 Resistência à compressão.....	94
4.2.2 Absorção de água por capilaridade.....	95
4.2.3 Controle de umidade nos corpos de prova durante o processo de envelhecimento acelerado.....	97
4.2.4 Potencial de corrosão nos corpos de prova prismáticos.....	99
4.2.5 Potencial dos pares dos sensores instalados nos corpos de prova prismáticos.	110
4.2.6 Teste de corrente galvânica.....	122
4.2.7 Método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata (AgNO_3).	131
5. ANÁLISE ESTATÍSTICA E DISCUSSÃO.....	140
5.1 INFLUÊNCIA DO COBRIMENTO NOS RESULTADOS DE POTENCIAL DE CORROSÃO.....	140
5.1.1 Bloco I – 1 dia de cura úmida.....	140
5.1.2 Bloco II – 91 dias de cura úmida.....	141
5.2 INFLUÊNCIA DO COBRIMENTO NOS RESULTADOS DE POTENCIAL DO PAR.....	142
5.2.1 Bloco I – 1 dia de cura úmida.....	142
5.2.2 Bloco II – 91 dias de cura úmida.....	144
5.3 INFLUÊNCIA DO COBRIMENTO NOS RESULTADOS DE CORRENTE GALVÂNICA.....	146
5.3.1 Bloco I – 1 dia de cura úmida.....	146
5.3.2 Bloco II – 91 dias de cura úmida.....	147
5.4 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE.....	149
5.4.1 Bloco I – 1 dia de cura úmida.....	149
5.4.2 Bloco II – 91 dias de cura úmida.....	150
5.5 INFLUÊNCIA DO NÍVEL DE RESISTÊNCIA.....	152
5.5.1 Teste de potencial de corrosão.....	152
5.5.2 Teste do potencial do par.....	153
5.5.3 Teste de corrente galvânica.....	153
5.5.4 Teor de umidade.....	154
6. ANÁLISE CRÍTICA.....	155
6.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE E_{corr} , E_{par} e E_{par}	155
6.2 EFEITO DO COBRIMENTO LATERAL.....	156
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	159
7.1 CONCLUSÕES.....	159
7.1.1 Primeira etapa -Testes em solução aquosa.....	159
7.1.2 Segunda etapa - Testes em corpos de prova de concreto armado.....	159

7.2	INTERPRETAÇÃO GERAL.....	162
7.3	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	162
	REFERÊNCIAS.....	165
	ANEXOS	175

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento de estruturas de concretos pode consistir em simples inspeções visuais realizadas periodicamente. Esse tipo de monitoramento é primário e embora seja a base da maioria dos programas de gestão de pontes ou de outras estruturas de grande importância social, pode detectar deteriorações apenas em estágios bastante avançados, quando as fissuras, manchas de corrosão, deslocamentos de cobrimentos e deformações excessivas das estruturas já estão presentes nos elementos estruturais. Uma forma de monitoramento intermediário combina inspeções visuais com investigação detalhada, usando técnicas de ensaios não destrutivos ou destrutivos. Um controle mais completo implica o uso de sensores embutidos no concreto que podem ser colocados na estrutura no momento da construção ou inseridos posteriormente (ALMEIDA *et al.*, 2011).

Um sistema de monitoramento integrando inspeções visuais, investigação detalhada e sensores permite detectar de forma precoce o risco de corrosão nas armaduras entre outras manifestações patológicas. Desta forma as ações de manutenção ou sistemas de proteção podem ser programadas de modo a se gastar menos recursos evitando intervenções mais complexas e caras. Além disso, o monitoramento admite prever o desempenho futuro da estrutura e tomar decisões quanto ao tempo ideal para fazer uma intervenção.

Para o monitoramento da corrosão em pontes e viadutos, por exemplo, são necessários sensores embebidos no concreto que medem parâmetros eletroquímicos para a durabilidade das armaduras, designadamente: potencial de corrosão, resistividade do concreto, corrente galvânica, resistência à polarização entre outras técnicas eletroquímicas (SANTOS, 2014).

Parâmetros como o potencial de corrosão (E_{corr}) e a corrente galvânica (I_{gal}) são grandezas sensíveis de serem medidas porque a corrosão do aço é um fenômeno de natureza eletroquímica que leva à formação de micro ou macro-pilhas ao longo da superfície das armaduras (ALMEIDA *et al.*, 2011). Essas pilhas de corrosão são produto das heterogeneidades na superfície das armaduras, o que favorece a formação de zonas com diferentes níveis de energia (ânodo e cátodo) entre as quais se estabelece uma movimentação de elétrons através do concreto (eletrólito), formando assim um circuito (MADRID *et al.*, 2001).

Essa transferência de elétrons cria uma corrente elétrica (I_{gal}), sendo possível então mensurar a diferença de potencial entre a região de carácter anódica em relação à de carácter catódica (ALMEIDA, 2011). Pela lei de Ohm esse fluxo de corrente entre as regiões mencionadas está limitado pela resistência do eletrólito, a resistência de polarização anódica (R_A) e a resistência de polarização catódica (R_C) (ANDRADE *et al.*, 2008; ORTIZ *et al.*, 2007).

Nesse contexto, a utilização de macro-pares galvânicos para o monitoramento da corrente galvânica (I_{gal}) é um dos sistemas mais simples na área de sensores de corrosão, pois conectando-se dois metais, se gera um circuito como o descrito anteriormente, no qual se desenvolve uma corrente galvânica que pode ser detectada por um amperímetro de resistência nula e analisada para se obter os dados sobre a corrosão (RAUPACH e SCHIESSL, 2001).

Os sensores de potencial de corrosão são em princípio eletrodos estáveis que com o avanço tecnológico na área tem se tornado versátil e possibilitam medir a corrente galvânica ou até mesmo resistência à polarização (ALMEIDA *et al.*, 2011).

Não obstante, os sensores galvânicos contrariamente aos tradicionais eletrodos de referência, não estão baseados em reações termodinamicamente reversíveis e, em lugar disso, consistem em pares bimetálicos que mantêm um potencial estável por um tempo determinado. A sua estabilidade é baseada no meio ambiente específico do concreto e pode ser explicado e calibrado utilizando a teoria eletroquímica (PAWLICK *et al.*, 1998).

Um dos sensores galvânicos comercializados é o Sensor de múltiplos elétrodos *CorroWatch Multisensor*, da empresa *Force Technology*. Este determina o potencial de circuito aberto das barras do ânodo com o uso do eletrodo de referência ERE20 (Mn/MnO_2) embutido na sua proximidade, e a temperatura do concreto por meio de elétrodo específico embutido na base do sensor (FORCE TECHNOLOGY, 2012). Usualmente, a avaliação do risco de corrosão é feita com a determinação da corrente galvânica e do potencial de circuito aberto.

1.1 HIPÓTESES

Os sensores de corrosão podem ser construídos no Brasil inspirados nos equipamentos importados usando materiais brasileiros. O uso de sensores na medição da corrosão em campo é uma técnica eficaz para o controle e prevenção oportuna da corrosão tanto como as técnicas eletroquímicas usadas no laboratório para o mesmo fim. Neste trabalho pretendesse comparar leituras de potencial de circuito aberto obtidas por meio da técnica eletroquímica tradicional com as que ofereçam os sensores de corrosão confeccionados nos laboratórios do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná com materiais brasileiros e padrões semelhantes aos equipamentos importados.

1.2 OBJETIVO

Avaliar a eficácia de um sensor galvânico de Aço carbono/Cobre para identificar o momento que ocorre a despassivação do aço embebido no concreto armado pela penetração de cloretos.

Objetivos específicos:

- Elaborar um sensor galvânico de Aço carbono/Cobre para detecção do efeito da frente de contaminação por cloretos em termos de corrosão de armaduras.
- Avaliar a estabilidade de potencial do sensor em um meio semelhante à solução intersticial do concreto com e sem a presença de íons cloretos.
- Confeccionar corpos de prova de concreto armado com sensores embebidos, avaliar seu comportamento e analisar se existe correlação as leituras de potencial de corrosão de circuito aberto com as leituras de corrente galvânica e potencial do par.

1.3 JUSTIFICATIVAS

O monitoramento constante das estruturas que formam a infraestrutura civil e dão suporte às mais diversas atividades da sociedade moderna é um procedimento necessário, uma vez que a detecção preventiva dos problemas permite a utilização de métodos mais simples e econômicos para avaliação e reparo. Para tais fins os métodos de ensaios não destrutivos (END) tornam-se uma estratégia de investigação bastante atraente e viável (CAETANO *et al.*, 2011).

Os critérios de sustentabilidade (ecologicamente adequado, economicamente viável e socialmente justo), não permitem mais a simples substituição, com demolição e reconstrução de estruturas novas. Isso vem exigindo um maior conhecimento dos mecanismos envolvidos na diminuição do desempenho estrutural, e ampliação do conhecimento do comportamento estrutural global de forma que as intervenções sejam adequadas às situações em que cada estrutura se encontra (ALMEIDA *et al.*, 2011).

A intervenção em pontes e viadutos de grande porte quando seu funcionamento está comprometido pela avançada degradação do material por fenômenos patológicos como a corrosão, usualmente eleva o custo das ações construtivas necessárias. Estima-se que cerca de 5% do PIB de uma nação sejam direcionados à solução de problemas relacionados à corrosão. No Brasil, esse gasto ultrapassa os R\$ 10 bilhões ao ano (CALLISTER, 2008 *apud* CEDRIM *et al.*, 2016).

O custo de reintegração das estruturas afetadas pela corrosão é significativamente alto (XI e YANG, 2017). Em todo o mundo, os custos de manutenção e reparação das infraestruturas de concreto armado afetadas pela corrosão são estimados em torno de US \$ 100 bilhões por ano (CHEN, 2004 *apud* LI e YANG, 2011).

Dentro deste contexto uma das vantagens da aplicação de sensores na medição da corrosão é que permite a avaliação de diferentes cenários o que

permite diminuir o consumo de materiais ajudando no controle e minimização do impacto no meio ambiente (RODAGEM, DER/PR 2012; BÄSSLER *et al.*, 2013).

No Brasil, apesar da Indústria do Cimento caminhar no sentido da sustentabilidade para conciliar o desenvolvimento de sua atividade com a proteção do meio ambiente, de acordo com o Sindicato Nacional da indústria do cimento (SNIC), o impacto ambiental é considerável se for analisado que cerca de 25% do cimento produzido no país vai para obras de infraestrutura segundo estudo realizado para o SNIC pela Fundação Gentílio Vargas (FGV) no ano 2013.

O uso de sensores colaboraria na prevenção de um colapso evitando mortes assim como uma avaliação estrutural após um acidente. Por exemplo, Holland (2011) relata que após o choque de uma balsa cheia de grãos com a ponte 1-20, que atravessa o rio Mississippi nos Estados Unidos da América, em abril de 2011, um sistema de monitoramento integrado concebido e desenvolvido pelo *U.S. Army Engineer Research and Development Center (ERDC)* foi usado para verificar o estado da estrutura e rapidamente fornecer informações sobre danos. Desta maneira, a ponte foi interditada por apenas 2 horas e os engenheiros ficaram atentos ao comportamento da ponte nas semanas seguintes.

De forma diferente, em outra ponte (I-35W), sobre o mesmo rio onde somente eram feitas as inspeções visuais a cada dois anos até 1996 e anuais a partir de então até 2007, não foi possível evitar as 13 mortes e os 121 feridos quando desmoronou em agosto de 2007. A ponte que a substituiu ganhou vários prêmios e foi concebida com um sistema de monitoramento integrado e anual a partir de então (NERY, 2013).

A *Federal Highway Administration (FHWA)* dos EUA, no seu site oficial, em concordância com um reporte da *American Society of Civil Engineers (ASCE)* do ano 2013, expõe que para recuperar as pontes em um estado estrutural deficientes para o ano 2028, deverá investir 20,5 bilhões de dólares ao ano. Na Europa, o custo estimado anual com manutenção em pontes de concreto é em torno de 1 bilhão de euros (ZOGHI, 2013).

No Brasil, de acordo com previsões do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), até o ano 2025, a necessidade de investimento em 15 pontes que atendem a 12 estados da Federação, vai requerer um volume de 809,6 milhões de reais, dos quais 11 % é para recuperação ou ampliação (IPEA, 2010). Tal estudo, focado no diagnóstico e perspectiva da infraestrutura econômica no país, mesmo não sendo exaustivo, fornece uma ideia de quanto dinheiro pode e vai ser gasto na recuperação das Obras de arte da infraestrutura do Brasil.

Os dados obtidos a partir dos sensores podem ser usados em modelos matemáticos de previsão de vida útil da estrutura. Trabalhando com a

manutenção preventiva e o conceito de vida útil, sabe-se quando fazer reparos ou se eles serão necessários (BÄSSLER *et al.*, 2013). (E_{par})

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MONITORAMENTO DAS OAEs

No projeto das obras de arte especiais (OAEs) são utilizadas características conhecidas dos materiais, como resistência à compressão, resistência a ataques químicos e a intempéries, além de expectativas de carregamento e condições de exposição/funcionamento em uso. Porém, as reais interações entre a estrutura e o ambiente no qual ela está inserida são difíceis de prever ou simular. Além do carregamento em uso, que pode variar de forma diferente do previsto, com incremento de tráfego sobre uma ponte, por exemplo, existem outras incertezas possíveis provenientes de sobrecargas acidentais, tais como terremotos, inundações, etc. Todas estas incertezas fazem com que uma previsão precisa da degradação da estrutura ao longo do tempo seja difícil (NERY, 2013).

Também não se pode esquecer do efeito das mudanças de macro clima e de micro-clima que podem ocorrer ao longo da vida útil de obras de arte especiais. O trabalho de (MEDEIROS *et al.*, 2012) em uma inspeção no palácio da Luz, Uruguai, evidenciou mudança no macro clima e seu efeito direto no aumento da velocidade de carbonatação do concreto da estrutura inspecionada. Ainda sobre o tema de mudanças de macro ambiente, Medeiros Junior *et al.* (2014) apresentam um estudo sobre as modificações de umidade relativa e temperatura do ambiente na previsão de vida útil de estruturas de concreto armado. Especificamente sobre as OAEs, Medeiros Junior *et al.* (2015) apresentaram um trabalho de pesquisa em um viaduto com 57 anos de tempo em serviço demonstrando os diferentes micro-climas atuantes neste estudo de campo.

As inspeções no Brasil são realizadas de acordo com a norma DNIT 010/2004-PRO “Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido– Procedimento”, avaliando o desempenho por inspeções visuais. Entretanto, existem parâmetros de degradação cuja mensuração visual é inviável.

Em câmbio, a informação obtida por meio dos sensores serve para uma programação mais eficiente das ações de manutenção, minimizando os custos diretos associados a intervenções e os custos indiretos decorrentes de restrições de funcionamento das Obras de arte da infraestrutura civil (OAEs) (SANTOS, 2014). Dessa forma, o monitoramento da corrosão nas OAEs pode se tornar muito mais eficiente. Sendo essa a principal motivação nesse trabalho que levou a elaborar um sensor galvânico para o monitoramento da corrosão com materiais brasileiros.

De acordo com o Manual para a preservação de pontes da Federal Highway Administration (FHA) dos EUA, um programa efetivo de preservação usa estratégias e práticas de longo prazo para preservar as condições das pontes e estender o período de vida útil (FHA, 2011).

Essas estratégias e práticas em longo prazo geralmente incluem atividades cíclicas de manutenção executadas em intervalos pré-determinados. A aplicação de inovações tecnológicas como sensores embebidos no concreto pode tornar o processo de monitoramento e preservação das pontes mais sustentável e inteligente (HOOKS *et al.*, 2011).

2.1.1 Definição

Monitoramento do comportamento de uma estrutura é uma forma de avaliação do seu desempenho com base em valores diretamente medidos *in situ*, permitindo a verificação das teorias de comportamento estrutural consideradas na modelagem e análise dessa estrutura, bem como a detecção precoce de eventuais deficiências estruturais e de durabilidade frente ao meio ambiente em que esteja a estrutura inserida. Consiste na coleta periódica e organizada de informação, seguida de uma análise sistemática dessa informação (SANTOS, 2014).

O monitoramento categoriza a extensão da deterioração dos elementos da OAE. Na inspeção deve ser considerado o material usado na OAE assim como a condição física dos tabuleiros (*decks*) e os componentes da superestrutura e subestrutura da OAE (FHA, 2011).

A definição do estado estrutural da OAE em tempo real é o pilar para a gestão da sua manutenção ou preservação. A prática da inspeção tem sido adotada pela maioria dos departamentos de transporte nos Estados Unidos da América. Proprietários de pontes em todo o país têm reconhecido os benefícios da avaliação detalhada das condições da estrutura através da análise da informação obtida nas inspeções (MARSHALL *et al.*, 2013).

O monitoramento da estrutura auxilia nas inspeções provendo ao especialista de um histórico de degradação e comportamento que possibilita um melhor entendimento de possíveis problemas e a identificação de causas; certificar uma estrutura em relação à fidelidade ao projeto; avaliar a segurança de uma estrutura antiga ou num dado momento em que condições especiais se apresentem e otimizar programas de manutenção (NERY, 2013).

2.1.2 Vantagens do monitoramento

As vantagens do monitoramento de OAEs são diversas e são função do que se está inspecionando de maneira global. Segundo Santos (2014) e Inaudi (2009), as principais vantagens são:

- Reduz a incerteza com relação ao real estado dos materiais presentes na estrutura, as cargas que realmente estão atuando nela e o seu envelhecimento, aspectos que geralmente são desconhecidos no momento de tomar decisões sobre o que fazer para conservar a Obra de Arte Especial (OAE). O domínio proporcionado pelo monitoramento permite reduzir os custos e possíveis riscos nas estratégias que sejam traçadas para a manutenção.
- Permite incrementar as margens de segurança das pontes sem necessidade de intervir na estrutura, tomando vantagens de materiais com melhores propriedades ou adequações no projeto (over-design), incrementando de maneira segura o período de vida útil ou capacidade de carga. Isto quando a OAE está em condições melhores das esperadas.
- Ajuda na avaliação da qualidade da estrutura durante a construção, operação, manutenção e reparação e, portanto, elimina os custos ocultos por deficiência de qualidade, já que muitos dos defeitos e danos na estrutura são gerados durante os processos de construção.
- Permite a detecção prematura de comportamentos anômalos na estrutura, reduzindo o risco de colapso súbito, contribuindo assim para a preservação de vidas humanas e bens materiais.
- Permite antecipar e fundamentar juízos sobre as consequências, para a estrutura, de um evento extremo como um sismo, incêndio de veículos ou colisão destes com elementos estruturais.
- Permite programar mais eficientemente as ações de manutenção, tornando-se assim possível prolongar a vida útil de uma estrutura, minimizando os custos diretos associados a intervenções e os custos indiretos decorrentes de restrições de funcionamento.

Além do que já foi argumentado pelos autores citados, um sistema de monitoramento de OAEs pode ser empregado para gerar informações que sejam usadas para mapear territorialmente estruturas com prioridade de manutenção preventiva ou mesmo manutenção corretiva. Um exemplo deste tipo de abordagem está sendo dada no projeto “Desenvolvimento e Aplicação de Metodologia de Avaliação Objetiva das Condições Funcionais e Estruturais de Obras de Arte Especiais”, desenvolvido em uma parceria entre o Departamento Nacional de Infraestrutura de transporte (DNIT) e a Universidade Federal do Paraná (UFPR), coordenado pelo Professor da UFPR Mauro Lacerda Santos Filho.

O objetivo é produzir um panorama geral do estado de conservação das OAEs nos estados do Paraná e Santa Catarina de modo a produzir um mapa de

priorização de aplicação do recurso existente para manutenção de pontes e viadutos que estejam efetivamente em estado crítico de conservação.

Sendo assim, o projeto não está estagnado especificamente no monitoramento, mas como parte dele são desenvolvidas atividades de inspeção e acompanhamento orientadas pelo DNIT, o que no fim pode ser categorizado como um plano de monitoramento ao longo do tempo. Esse é um exemplo de monitoramento baseado em inspeções de rotina, porém o foco deste trabalho está no monitoramento utilizando sensores que possam produzir informações sobre o estado de conservação remota, sendo desse modo um avanço em relação ao sistema atualmente usado rotineiramente pelo DNIT. O que implicaria em economia de tempo e recursos.

2.1.3 Abordagens do monitoramento

O monitoramento pode ter duas abordagens básicas que podem ser usadas em conjunto em alguns casos: relativo ao comportamento estrutural ou relativo ao comportamento do material e sua interação com o meio ambiente. A escolha de uma ou outra define desde os tipos de sensores usados até o tipo de informação que se obtém (INAUDI, 2009).

A abordagem relativa ao comportamento estrutural fornece informações relativas à resposta da estrutura a cargas aplicadas, confirmação de comportamento previsto em projeto, modificações no sistema estrutural, entre outras. Normalmente é usado em conjunto com modelos matemáticos da estrutura para comparação de valores teóricos com valores medidos (NERY, 2013).

Uns dos procedimentos que usa este tipo de abordagem são os ensaios de carga para mensurar a inconformidade da resistência real da estrutura ou um dos seus elementos, com relação ao que foi estabelecido no projeto. Outro caso pode ser a análise ou avaliação do comportamento estrutural depois de um acidente ou de um reforço estrutural; todas estas análises usam os dados obtidos no monitoramento antes e depois do evento ou ensaio.

Entretanto, a abordagem relativa ao comportamento do material e sua interação com o meio ambiente produz principalmente informações relativas ao tipo de material da estrutura grau de envelhecimento, estado de degradação, modificação química de componentes, umidade, temperatura, entre outras (NERY, 2013).

Desse modo, os fenômenos decorrentes da interação do concreto armado com o meio ambiente, que geralmente provocam modificações de suas características, são foco deste tipo de abordagem de monitoramento, por exemplo: efeito da variação de pH do concreto na probabilidade de corrosão da armadura, efeito da contaminação de cloretos na velocidade de corrosão de

armaduras, entre outros. Esta abordagem normalmente é usada em conjunto com modelos de previsão de vida útil.

2.1.4 Planejamento do sistema de monitoramento

O projeto de monitoramento é composto por várias etapas, sendo responsável por acompanhar o desenvolvimento de uma ou mais grandezas que permitam avaliar a evolução de mecanismos de degradação, garantindo que estes não provoquem um dano e fornecendo informações relevantes para a manutenção da estrutura. A informação gerada pelo sistema de monitoramento permite a composição de um prognóstico do problema facilitando o planejamento e otimização de uma intervenção (NERY, 2013).

Para projetar um sistema de monitoramento é preciso ter em conta os requerimentos e características da estrutura que vai ser acompanhada (INAUDI, 2009). Para este efeito, torna-se indispensável o adequado planejamento que deve estar presente tanto na concepção do sistema de monitoramento, como na sua posterior implementação (SANTOS, 2014).

Primeira etapa: Definição clara e sucinta do objetivo do monitoramento (NERY, 2013), que consiste em identificar o provável mecanismo de degradação incidente e os riscos associados (INAUDI, 2009). Alguns dos possíveis objetivos podem ser: verificação de integridade da estrutura após um terremoto; confirmação da eficácia de uma determinada solução para um problema existente na estrutura; acompanhamento da evolução de um problema para planejamento e otimização de intervenção; certificação da estrutura em relação ao projeto; determinar o avanço de um fenômeno patológico, os riscos associados a este e a deterioração que tem originado na estrutura.

Definir claramente os objetivos do monitoramento condicionará todas as ações subsequentes, inclusive o tipo de sensor que se deve utilizar. Permite orientar o sistema de monitoramento e faz com que este seja controlável. Na maioria dos casos, o objetivo vai determinar a abordagem a ser usada.

Segunda etapa: Definir a abordagem a ser usada, relativa ao material ou relativa à estrutura. Com a abordagem definida é possível determinar o tempo de aplicação do monitoramento, as grandezas e abrangências a serem monitoradas e o nível até o qual vai chegar o Sistema de Monitoramento. É recomendável nesta fase alguma interação com o dono da obra ou projetista, ou no caso de estruturas existentes, os responsáveis pela sua conservação (INAUDI, 2009; NERY, 2013; SANTOS, 2014).

É preciso estabelecer o nível de diagnóstico que será conseguido a partir dos dados gerados pelo monitoramento, em outras palavras, a quantidade, qualidade e frequência de informações coletadas. Os níveis comumente usados são:

Nível 1 - Detecção da existência de dano;

Nível 2 - Detecção e localização do dano;

Nível 3 - Detecção, localização e quantificação do dano;

Nível 4 - Estimativa da vida útil remanescente da estrutura (prognóstico);

Nível 5 - Autodiagnóstico;

Nível 6 - Auto-reabilitação (reparo).

De acordo com NERY (2013), até 2013 os níveis 5 e 6 eram metas dos pesquisadores, mas que ainda não tinham se tornado realidade no contexto da época.

O tempo de aplicação é função do processo de degradação que se quer monitorar, dos efeitos provocados na estrutura por esta degradação, e do uso da estrutura. Pode variar desde alguns dias até toda a vida útil da estrutura. O tempo de aplicação influencia os materiais e métodos usados no monitoramento (INAUDI, 2009; NERY, 2013). A degradação provocada pela corrosão da armadura, por exemplo, geralmente é perceptível anos depois do fenômeno ter começado sendo importante que os sensores tenham durabilidade suficiente para funcionarem durante décadas.

As grandezas são os parâmetros que serão objetos de monitoramento, e estão em função do objetivo e nível do monitoramento. Devem representar da maneira mais direta e fiel possível o dano que se deseja acompanhar. As grandezas podem ser de natureza mecânica, física ou química (NERY, 2013), e se agrupam em três grupos: 1 - ações como a velocidade e direção do vento, temperatura e umidade relativa, tráfego ou sismos; 2 - grandezas estruturais como os deslocamentos verticais, as rotações, as extensões e as variações das aberturas das juntas de dilatação, etc.; e 3 - grandezas associadas à durabilidade e comportamentos dos materiais, uma vertente que tem assumido progressivamente importância, sobretudo em relação à prevenção da corrosão nas estruturas de concreto armado (SANTOS, 2014).

Se o objetivo do Sistema de Monitoramento é acompanhar ao longo do tempo a corrosão de armaduras, assumindo uma abordagem relativa ao material, os parâmetros mais importantes a considerar são: penetração de cloretos; penetração de sulfatos; pH; frente de carbonatação; e potencial de corrosão, todos eles de natureza química; assim como a resistividade e corrente galvânica. Outras grandezas que poderiam ser consideradas no monitoramento são a deformação, abertura de fissuras e perda da capacidade de carga, de natureza mecânica, que geralmente são decorrentes da degradação da estrutura produto da corrosão da armadura, porém, podem também ter outras causas.

A abrangência do sistema de monitoramento se refere à escala e distribuição dos sensores e tem a mesma importância que a definição da grandeza ou a tecnologia utilizada (NERY, 2013).

Terceira etapa: Selecionar os sensores. Só quando se está em domínio destas informações (objetivo, nível, grandezas a serem monitoradas e a abrangência) podem-se escolher os sensores de acordo com a durabilidade, tecnologia, precisão, resolução e exigências do local de aplicação (INAUDI, 2009; NERY, 2013). Se um sistema de monitoramento começa a partir da seleção dos sensores, usualmente termina com uma quantidade grande de dados, mas nenhum plano de como analisar os dados.

2.1.5 Uso dos sensores em um sistema de monitoramento

Sistematizar as inspeções visuais pode certamente reduzir o nível de incerteza com relação ao estado da estrutura, mas esta técnica apresenta importantes limitações já que se baseia em observações superficiais da estrutura durante pequenos espaços de tempo (INAUDI, 2009) podendo-se incorrer em perigosos erros e uso ineficiente de recursos para manutenção das Obras de Arte Especiais (OAEs).

Segundo Santos (2014), entre meados das décadas de 40 e de 70 a maioria dos equipamentos usados no monitoramento das OAEs eram baseados em fundamentos mecânicos. Progressivamente foram complementados com equipamentos elétricos, de corda vibrante e pares termoeletricos. Em uma segunda etapa, entre meados das décadas de 70 e de 90, os equipamentos evoluíram e passaram a apresentar menores dimensões e maior confiabilidade e estabilidade. Mas a técnica de monitoramento ainda consistia na realização de medições no âmbito de campanhas de observação periódicas in situ.

A evolução dos sistemas de medição levou à progressiva utilização de sensores que permitem medições automáticas. De forma tal que a tendência com relação ao monitoramento das OAEs é que a inspeção não seja limitada ao visual, lançando mão cada vez mais de equipamentos específicos para a realização de monitoramento não destrutivo (ARAÚJO, 2013).

Através dos sensores é possível, sem a presença de operadores, proceder à aquisição de forma regular, garantir a simultaneidade de leituras em diversos pontos e, conseqüentemente, a compatibilidade das diversas medidas, bem como possibilitar uma melhor comparação com os modelos (SANTOS, 2014).

Araújo (2013) corrobora o exposto anteriormente com relação às inspeções visuais como técnica de monitoramento exclusivo, quando afirma em um artigo da revista “Infraestrutura, projeto, custos e construção” que ainda não existe um critério normalizado sobre como desenvolver as inspeções visuais e

isto traz inúmeras dificuldades já que, por exemplo, o profissional que faz a inspeção em um determinado ano pode não ser o mesmo no ano seguinte, e o novo responsável tomará como base o relatório anterior, o que pode criar confusão se os conceitos adotados não forem os mesmos. Porém, é preciso tomar atitudes a partir dos resultados da inspeção. Se a verificação constata uma mancha de corrosão em um pilar, é preciso deixar claro que, em um determinado prazo, será necessário averiguar a extensão do problema, sendo recomendada a realização de ensaios como o ensaio de Potencial de corrosão, mas isso nem sempre é feito.

Entretanto, um Sistema de Monitoramento integrado que inclua inspeções visuais e seguimento de grandezas através de sensores é mais eficaz. Um sistema desse tipo pode ser útil no gerenciamento da estrutura desde a etapa de construção, por exemplo, indicar quando o concreto já pode ser desmoldado, acompanhar a distribuição de tensões durante a montagem de pontes com estruturas estaiadas ou evitar problemas com o tabuleiro (NERY, 2013).

2.2. CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

A corrosão é um processo natural de degradação dos metais. Leva à perda de massa do aço e às alterações dimensionais. No final da construção, a armadura nas estruturas de concreto armado é fisicamente protegida contra a corrosão pela barreira imposta pelo concreto e por uma camada passiva protetora formada por produtos de corrosão insolúveis em torno das barras. No entanto, ações externas como a penetração de espécies agressivas Cl^- ; SO_4^{2-} ; CO_2 ; H_2O e O_2 , favorecem a corrosão eletroquímica (TORRES LUQUE *et al.*, 2014) da armadura.

O processo eletroquímico envolve reações de oxidação e redução, ocasionando a degradação do material metálico e das suas propriedades. A partir do ingresso desses agentes agressivos na superfície dos metais, se produzem zonas de diferentes níveis de energia que propiciam a formação de uma célula ou pilha eletroquímica (MADRID *et al.*, 2001).

Nessa célula de corrosão, a superfície da armadura funciona como um eletrodo misto, composto por ânodo e cátodo eletricamente conectados pelo próprio metal, sobre o qual as reações anódicas e catódicas ocorrem (DHAWAN *et al.*, 2014).

A solução aquosa presente nos poros de concreto age como um eletrólito, cujas propriedades (pH e presença de contaminantes iônicos) controlam a ocorrência da reação anódica. De forma análoga, a reação catódica é limitada pelo pH da solução de poros, bem como pela disponibilidade de oxigênio junto a barra. Havendo as condições propícias para a ocorrência de ambas as reações de meia-célula, a corrosão do aço é estabelecida (DAHMAH, 2003; QIAO e OU, 2007 *apud* PORTELLA, 2014).

Desta forma, a corrosão pode ser dividida em dois processos eletroquímicos: primário e secundário. No processo eletroquímico primários (reação anódica), o ferro da barra dissolve-se na água dos poros $\{Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}\}$ liberando elétrons, os que se movem-se pela armadura até o cátodo onde se combinam com o oxigênio e a água aí presentes, formando íons hidroxila $(OH)^{-}$ pela reação $\{\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^{-} \rightarrow 2(OH)^{-}\}$ para preservar a neutralidade elétrica, isto é: a reação catódica. Por sua vez, os íons OH^{-} deslocam-se através do eletrólito, até ao ânodo, reagindo com o íon ferro e permitindo a formação de $Fe(OH)_2$ através da reação $\{2Fe + O_2 + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2\}$. Finalmente, o oxigênio dissolvido na água, reage com o hidróxido de ferro para originar o óxido de ferro hidratado (que é a ferrugem marrom) $\{4Fe(OH)_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + 2Fe_2O_3 \cdot H_2O\}$ (NIMMO e HINDS, 2003; ANDRADE *et al.*, 2008; TORRES LUQUE *et al.*, 2014). A Figura 1 ilustra o processo descrito.

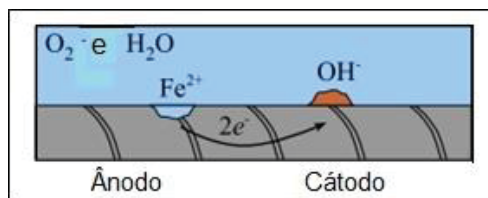


Figura 1: Pilha eletroquímica. Fonte: TORRES LUQUE *et al.* (2014).

Geralmente essa ferrugem ocupa aproximadamente seis vezes o volume do material original, o que gera tensões internas e finalmente rachaduras no concreto. Consequentemente, a permeabilidade aumenta, permitindo a entrada de agentes agressivos que aumentam a corrosão e isso provoca maior fissuração. Assim, as rachaduras podem aparecer apenas como uma única rachadura, ou como um deslocamento do cobrimento da armadura (MAIA e ALVES, 2017).

As duas causas mais comuns de corrosão de reforço são: (1) desagregação localizada do filme passivo do aço por íons cloreto e (2) desagregação geral da passividade por neutralização do concreto, predominantemente por reação com CO_2 atmosférico cuja concentração tem crescido no ambiente moderno devido à poluição industrial (DHAWAN *et al.*, 2014).

Nesta pesquisa interessa a corrosão iniciada pela presença de íons cloretos, já que para induzir a corrosão nos corpos de prova foi usada uma solução de NaCl. Este contaminante pode estar presente nos mais diversos meios (solo, água e ar) mas a sua interação com o concreto armado é especialmente estudada em regiões litorâneas. O tipo mais comum de corrosão de concreto armado exposto aos íons cloreto é a corrosão por pites (HELENE, 1993).

O íon cloreto (Cl^{-}) é o ânion agressivo que maior efeito produz nas propriedades de corrosão. Isso ocorre porque o Cl^{-} tem o raio menor do que

outros íons agressivos, então sua capacidade de difusão é alta (GLASS e BUENFELD, 1997; GLEITER, 2000).

Os cloretos podem atacar a armadura no interior do concreto a partir de uma fonte interna ou externa. Durante o processo de fundição podem ser introduzidos íons cloretos como resultado do uso de água do mar na mistura de concreto, uso de aditivos aceleradores de pega a base de cloreto de cálcio ou agregado que contém cloretos, os quais em ciclos de molhagem e secagem podem ser liberados e convertidos em íons livres. No entanto, na maioria dos casos os cloretos são provenientes de fontes externas, como o vapor de água do mar, ou o uso de sal no gelo derretido (EL-REEDY, 2008; PORTELLA, 2014).

A corrosão do concreto armado exposto aos íons cloreto é propiciada, então, pela presença e difusão de íons Cl^- livres, os quais se deslocam através dos espaços vazios e caminhos condutores da matriz cimentícia até atingir a barra de aço por difusão desde o exterior. A propagação de cloretos dentro do concreto depende não só do fator de difusão, mas também de outros fatores que influenciam na penetração inicial dos cloretos para o interior do concreto: o fenômeno de ascensão por capilaridade e o coeficiente de absorção, que determinam a entrada até os primeiros 5 mm do cobrimento externo (EL-REEDY, 2008; PORTELLA, 2014).

A chegada de cloretos nas proximidades da armadura, por si só, não representa o início do processo de corrosão. A película passiva protetora do aço sofrerá danos quando o conteúdo de Cl^- em torno da barra de aço atingir o conteúdo crítico. Em seguida, a corrosão será iniciada na presença de água e oxigênio no aço (JIN *et al.*, 2017).

A maioria das normas estrangeiras fixam os teores de Cl^- em relação à massa de cimento. Embora seja um ponto bastante polêmico o valor de 0,4% em relação à massa de cimento é um consenso na maioria das normas (CASCUDO, 1997). A norma NP EN 206, por exemplo, adota o valor de 0,4% como teor crítico de cloreto com relação ao teor de cimento do concreto (expresso em cloretos totais ou solúveis em ácido definido pela metodologia de análise: Volumetria de Precipitação - Método Argentimétrico) (SILVA, 2016).

A ABNT NBR 12655 (2006) “Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento” estabelece como teor de crítico de cloretos (Cl^-) no concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura 0,15 % com relação à massa de cimento.

Quando os íons cloreto atingem o aço carbono passivo começa o processo de pitting, quebrando o filme de passivação de forma localizada e, assim, iniciando a oxidação do ferro de modo a aumentar a acidez do concreto perto da superfície metálica, o que evita a re-passivação do aço. Em seguida, a fissuração da camada de cobertura de concreto facilita o contato direto do aço com o ambiente agressivo (MORRIS *et al.*, 2004).

O ataque se produz em zonas mais ou menos extensas da armadura, as quais se tornam anódicas em relação a outras. Esse processo é influenciado pela variação na composição química do eletrólito que circunda a barra. (FIGUEIREDO e MEIRA, 2013).

Esse mecanismo de degradação só se torna visível quando, em uma fase de maior progressão dos cloretos no interior da estrutura, quando manchas de corrosão aparecem nas superfícies das estruturas (ROMANO *et al.*, 2013).

No entanto, o desempenho de uma estrutura exposta a cloretos não é apenas determinado pelo teor crítico de cloreto, mas também depende da espessura e qualidade da cobertura de concreto. Quanto mais denso o concreto, mais tempo passará até que o teor crítico de cloreto seja atingido na superfície de aço. Isso também pode ser controlado pela dosagem do concreto, variando a relação a/c e o tipo de aglomerante (BENTZ *et al.*, 2000).

Reduzir a relação água-cimento (a/c) resulta na produção de concretos mais densos com pouca porosidade capilar. Nestes concretos, alguma porosidade capilar é gerada devido a retração química que ocorre durante a hidratação do cimento (BENTZ, 1997, JENSEN e HANSEN, 1997 *apud* BENTZ *et al.*, 2000). De forma tal que, a capacidade de transporte dos íons cloretos dentro do concreto será dominada por dois critérios: a fração volumétrica, a largura e a largura das fissuras (BENTZ *et al.*, 2000).

Na ausência de soluções de íons cloretos, a película protetora do aço permanece estável enquanto o valor de pH seja maior ou igual a 11,5, a menos que o concreto sofra ataque por sulfatos ou reação álcali agregados, fenômenos que formam compostos expansivos que fissuram o concreto e aumentam a sua permeabilidade, gerando acesso direto de água e corrosão atmosférica.

2.3. TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS

Apesar de o concreto endurecido apresentar-se fisicamente em fase sólida, a existência de solução entre os seus poros possibilita com que estruturas armadas sejam analisadas eletroquimicamente. Entretanto, as diferentes técnicas eletroquímicas usadas possuem várias limitações teóricas e práticas, principalmente quando estas forem aplicadas ao sistema aço-concreto, devido à complexidade deste sistema. A seguir apresenta-se um resumo dos aspectos importantes das técnicas que serão consideradas nesta pesquisa.

2.3.1 Potencial de corrosão (E_{corr})

É a técnica eletroquímicas mais simples entre as usuais e consiste na medição do potencial de corrosão das barras de aço do concreto armado, em relação a um eletrodo de referência em contato com a superfície do concreto. Trata-se de um ensaio padronizado pela norma internacional ASTM C 876, cujas

análises podem ser realizadas utilizando-se apenas um voltímetro de alta impedância ($> 20 \text{ M}\Omega$) conectado ao aço (terminal positivo) e a um eletrodo padrão (ROCHA, 2012).

As leituras consistem na diferença de potencial (ddp) entre as duas partes envolvidas no ensaio, que formam, em princípio, uma pilha eletroquímica composta por um eletrólito instável representado pelo sistema aço/concreto, e um eletrólito estável que é o eletrodo de referência (ROCHA, 2012).

O monitoramento do potencial de corrosão (E_{corr}) fornece apenas dados qualitativos. A probabilidade de estar, ou não, ocorrendo um processo de corrosão ativa fica somente vinculada ao valor desse potencial (MADRID *et al.*, 2001; DOTTO, 2006; ORTIZ *et al.*, 2007; SILVA, 2010; ROCHA, 2012).

Segundo Dotto (2006), de acordo com o método da ASTM C 876, o potencial estacionário, denominado de potencial de corrosão (E_{corr}), é um parâmetro que pode ser descrito como indica a Equação 2.

$$E_{corr} = E_{REF} - E_{aço} + IR_c \quad (2)$$

Onde, E_{corr} é o potencial de corrosão, medido externamente; E_{REF} é o potencial do eletrodo de referência; $E_{aço}$ é o potencial do aço e IR_c é o sobrepotencial de queda ôhmica no sistema, sendo que I é uma corrente de fundo de escala muito pequena, drenada pelo equipamento para fazer a leitura, e R_c é a resistência elétrica do concreto entre o eletrodo de trabalho e o de referência.

Então, o potencial de corrosão (E_{corr}) corresponde ao estado estacionário no qual se igualam as velocidades de reação de oxidação ($i_{anódica}$) e de redução ($i_{catódica}$), razão pela qual é representado graficamente pelo ponto de intersecção das linhas anódicas e catódicas da curva de polarização de Tafel para quando o aço está no estado passivo e a interface do sistema aço-concreto está em equilíbrio (MADRID *et al.*, 2001).

Dessa forma, o potencial de corrosão do reforço metálico é um potencial misto, resultante da combinação da cinética de pelo menos dois processos: o processo de oxidação anódica do ferro e a redução do oxigênio dissolvido, de acordo com a ASTM C 876 (2015).

Na Tabela 2 estão mostradas as relações encontradas na norma ASTM C876-15 para análise dos resultados de maneira a estimar a probabilidade de corrosão em determinada estrutura.

Tabela 1: Relações para estimar a corrosão.

Tipo de eletrodo	Probabilidade de corrosão		
	< 10%	10 % a 90 %	>90 %
ENH *	>0,118 V	0,118 V a -0,032 V	<-0,032 V
Cu/CuSO ₄ , Cu ²⁺ (ASTM C876)	>-0,200 V	-0,200 V a -0,350 V	<-0,350 V
Hg, Hg ₂ Cl ₂ /KCl (Sol, Saturada) **	>-0,124 V	-0,124 V a -0,274 V	<-0,274 V
Ag, AgCl/ KCl (1M)	>-0,104 V	-0,104 V a -0,254 V	<-0,254 V

*Eletrodo Normal de Hidrogênio, padrão.

** Eletrodo de Calomelano Saturado.

Fonte: ASTM C876 (2015).

2.3.1.1 Fatores que influenciam no potencial de corrosão

Algumas precauções são necessárias para assegurar uma boa análise quando está se aplicando a técnica de monitoramento do E_{corr} , pois o valor de potencial do aço é influenciado pelo conteúdo de umidade (MADRID *et al.*, 2001; TRANSPORTE, 2006; DOTTO, 2006). Por exemplo, deve-se ter o cuidado para que a superfície do concreto esteja umedecida, já que quando muito seco as medidas dos E_{corr} são difíceis de serem feitas, pois, a resistividade elétrica do concreto é muito alta (DOTTO, 2006).

Também, nos casos em que o concreto se encontra com os poros saturados (condição de imersão) a dificuldade do suprimento ou do transporte do oxigênio inibe a reação catódica, não há corrosão, mas estas condições tornam o valor do E_{corr} bastante catódico e pode assim falsamente indicar um processo instalado de corrosão ativa no metal de acordo com a ASTM C 876 (2015).

Quando o concreto está ao ar, isto é, com poros semisaturados, obtêm-se os valores mais confiáveis para o E_{corr} quando se usa a relação destes com a probabilidade de ocorrência de corrosão por meio do método da ASTM C876-15 (CIGNA *et al.*, 1993 *apud* DOTTO, 2006).

Os valores obtidos são indicativos, principalmente, quando eles são extremos, seja porque indicam corrosão avançada (valores de potencial muito negativo) ou ausência de corrosão (valores menos negativos). Estes valores estão relacionados com a curva de polarização do aço em meio alcalino (JOUKOSKI, 2003).

A distância do eletrodo de referência em relação à região anódica também influencia nos valores de potencial devido que às linhas de equipotenciais que se formam ao redor da área anódica. Cobrimentos de concreto sobre a armadura

superior a cinco centímetros também podem tornar os valores de potencial de corrosão menos negativos (ALMEIDA *et al.*, 2011).

Os cloretos e a carbonatação podem distorcer (e de maneira diferente) os valores verdadeiros dos potenciais medidos. Os cloretos tendem a tornar os potenciais mais negativos e a carbonatação tende a torna-los mais positivos (no geral vão se aproximando de zero, mas ainda na faixa dos valores negativos) (CASCUDO, 1997).

As concentrações crescentes de cloreto podem reduzir a concentração de íons ferrosos em volta do ânodo, tornando mais negativo o valor de potencial. Nessa situação, a menos que se conheça as propriedades químicas do concreto em volta do aço, o valor do potencial de corrosão não deve ser interpretado como indicativo de uma reação de corrosão. São necessários ensaios para determinar a profundidade contaminada com cloretos e se possível o teor de cloretos, segundo a ASTM C 876 (2015).

2.3.2 Corrente galvânica

Baseado no modelo simplificado do circuito elétrico formado durante a corrosão de uma macro-célula, a corrente elétrica total (I_{ME} corrente galvânica) formada entre o ânodo e o cátodo é dada pela diferença de potencial ($U_E = U_C - U_A$) dividida pelo somatório da resistência do eletrólito (R_{EL}), da resistência de polarização anódica (R_A) e da resistência de polarização catódica (R_C) (ANDRADE *et al.*, 2008), conforme Equação 1.

$$I_{ME} = \frac{U_C - U_A}{R_{EL} + R_A + R_C} = \frac{U_C - U_A}{k_p + R_A + R_C} \quad (1)$$

Onde (R_A) é a resistência anódica, (R_C) resistência catódica e (R_{EL}) resistência do eletrólito (resistividade do concreto).

Para fins de monitoramento da corrosão do aço em concreto armado interessa a corrente galvânica que aparece entre dois metais distintos no mesmo meio condutivo que pode ser mensurada sem aplicar uma corrente ou potencial externo (MCCARTER e VENNESLAND, 2004). Para medi-la, usa-se um amperímetro de resistência zero, conhecido como técnica *Zero Resistance Ammeter* (ZRA) (ARAÚJO *et al.*, 2013). Essa técnica tem sido utilizada pontualmente como uma forma de monitoramento da corrosão no concreto (RIBEIRO e CUNHA, 2014).

A técnica de corrente galvânica é semelhante à técnica de ruído eletroquímico (EN) mas se diferenciam no tipo de sinal analisado. Ambos os métodos só podem ser realizados com eletrodos embutidos, onde a corrente de acoplamento pode ser medida também entre o aço-carbono e um eletrodo de pseudo-referência feito a partir de um material mais nobre, que apresenta potencial eletroquímico estável em concreto (estado passivo). Na ausência de

barra de metal mais nobre, a medição pode ser feita entre um sensor e a armadura (em estado passivo) (CESEN *et al.*, 2013; ARAÚJO *et al.*, 2013).

Em concreto íntegro, essa corrente é desprezível, ou seja, muito baixa. Isso porque as barras de aço-carbono estão em estado passivo, portanto, apresentam uma diferença de potencial pequena e estável em relação ao cátodo também passivo. O mesmo não ocorre quando um processo corrosivo é estabelecido nas barras. Nesse caso, a corrente galvânica apresenta um valor significativo em decorrência da variação do potencial do ânodo, que assume valores mais negativos em relação ao obtidos inicialmente, em seu estado passivo (ARAÚJO *et al.*, 2013; LACERDA e MULLER, 2015).

Teoricamente, um aumento da corrente galvânica, acompanhado por uma diminuição do potencial de circuito aberto, indica que um nível crítico de íons cloreto foi atingido ou que a frente de carbonatação alcançou as barras do ânodo do sensor (ANDRADE *et al.*, 2008; ARAÚJO *et al.*, 2013).

Entretanto o valor da corrente galvânica estará em função dos metais envolvidos no par galvânico. Andrade *et al.*, (2008) estudaram o comportamento do sensor de múltiplos eletrodos da *Force Technology* no qual o cátodo é uma tela de titânio ativado e os ânodos são de aço carbono. Para esse par galvânico em uma fase inicial, enquanto a profundidade dos agentes agressores não tiver atingido a posição do primeiro ânodo, as correntes geradas entre os ânodos e o cátodo são relativamente baixas, isto é, permanecem na gama das correntes típicas do estado passivo ($< 2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). À medida que os agentes agressivos vão penetrando na camada de recobrimento do concreto, criam-se condições para a despassivação do primeiro ânodo, ânodo mais próximo da superfície, gerando-se uma corrente galvânica mais elevada, isto é, superior a $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (ANDRADE *et al.*, 2008).

No trabalho de Pereira *et al.* (2009), são indicados como o valor indicativo da condição passiva do aço de reforço $I_{\text{gal}} < 0,14 \text{ nA}/\text{cm}^2$ e $I_{\text{gal}} > 1 \text{ nA}/\text{cm}^2$ como indicativo da elevada taxa de corrosão. Nesse estudo o eletrodo de trabalho era uma barra de aço carbono e o eletrodo de referência uma barra de aço inox. A Tabela 2 mostra os limites indicados nos dois trabalhos que foram referidos.

Tabela 2: Valores indicativos da condição do aço.

CONDIÇÃO DO AÇO	Aço carbono/ Aço inox		Aço carbono/ Titânio ativado
	I_{gal} (nA/cm^2)	I_{gal} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	I_{gal} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Estado passivo	$< 0,14$	$< 0,00014$	< 2
Corrosão ativa	> 1	$> 0,001$	> 10
FONTE	PEREIRA <i>et al.</i> , 2009		ANDRADE <i>et al.</i> , 2008

O material utilizado como ânodo na pesquisa de Park *et al.*, (2003) foi o aço para reforço de concreto padrão (KS) D 3504 e como materiais catódicos foram utilizados o aço inoxidável tipo 304 (UNS S30400) e o cobre puro. Sendo que, a corrente galvânica do par aço/cobre foi maior que a do par aço/aço inoxidável, ou seja, o sensor de aço/cobre é mais adequado para um ambiente de alta resistividade. Nesse trabalho o valor de corrente galvânica no par aço/cobre ficou no intervalo de 10^{-6} A/cm² a 10^{-5} A/cm² (1 µA/cm² a 10 µA/cm²). Porém, não chega a estabelecer valores indicativos da condição do aço.

Park *et al.* (2005) deram continuidade ao trabalho anterior. Nesta ocasião os autores observaram que a corrente galvânica se manteve estável e perto de zero, entretanto os íons cloretos não tinham atingido as barras de aço do sensor. Após 80 dias, a corrente galvânica começou a apresentar valores de sinal negativos, indicando que o aço atuava como cátodo enquanto o aço inox e/ou cobre atuava como ânodos. Após 217 dias, a corrente ficou positiva e maior do que 0,04 µA/cm².

Pereira e Salta (2012) apresentam resultados de um sistema de sensores instalado durante 10 anos em uma obra. A partir da análise dos resultados ficou evidente que em decorrência da evolução da microestrutura do concreto aumentou a resistividade do material, o potencial de corrosão (E_{corr}) apresentou um ligeiro aumento ao longo do tempo, indicativo do estado de passivação das armaduras e a corrente galvânica medida (I_{gal}) se manteve muito baixa, próxima de 0 µA/cm² e também indicativa de que as armaduras se encontravam no estado passivo. Os autores Ribeiro e Cunha (2014), destacam que a corrente galvânica é da ordem de décimos de µA/cm².

Em outro estudo apresentado pelos mesmos autores onde se detectou a contaminação do concreto com agentes agressivos a 1 cm de recobrimento e uma análise química mostrou a presença de cloretos no material em uma percentagem de cloretos 1% relativo ao teor de cimento, o valor de corrente galvânica que indicou a despassivação do reforço foi de 25 µA/cm². O artigo sugere que os pares galvânicos implementados estavam formados por aço/aço inox.

Note-se que as condições de exposição consideradas por Pereira e Salta (2009) e Pereira e Salta (2012) são diferentes, esse último comenta resultados obtidos em sensores instalados em obras reais onde múltiplos fatores influenciam nos mecanismos de transporte dos agentes agressivos no concreto, assim como nas características do concreto ao longo do tempo.

Cesen *et al.* (2013) desenvolveram uma “matriz acoplada de múltiplos eletrodos”, (CMEA) siglas em inglês. A qual consiste em 25 barras de aço carbono com um diâmetro de 0,8 mm, dispostas em uma malha de 5 x 5 cm separadas 1,6 mm de centro a centro. Esta malha foi embebida em argamassa, foram expostos a 2 séries subsequentes, cada uma de 6 ciclos de molhagem e

secagem. Durante os primeiros 6 ciclos, utilizou-se água destilada para molhar, enquanto que nos segundos 6 ciclos foi aplicada uma solução de NaCl a 3,5%. Durante a primeira série, valores entre 10 e 30 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ indicaram o estado ativo dos eletrodos e durante a segunda série os valores positivos ficaram em torno de 200 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Contudo, não há uma faixa fixa de valores de corrente galvânica que caracterizam o estado ativo das barras de aço-carbono do ânodo. Isso porque existe uma variedade de interferências na corrente circundante, como a área dos eletrodos, a qualidade do concreto e o teor de íons cloreto no material (RAUPACH e SCHIESSL, 2001). Assim sendo, não é o valor absoluto da corrente que deve ser considerado, mas sim a variação de seus valores ao longo do tempo (ARAÚJO *et al.*, 2013)

Uma resposta anódica corresponde a uma corrente positiva, enquanto que uma resposta catódica corresponde a valores negativos da corrente medida (CESEN *et al.*, 2013). Valores negativos indicam que o potencial do aço que deveria estar atuando como ânodo é superior ao do metal mais nobre (PARK *et al.*, 2005) e a corrente galvânica permanece pequena.

Usualmente, recomenda-se que a leitura da corrente galvânica seja feita poucos segundos após o estabelecimento do contato elétrico entre o ânodo e o cátodo, já que essa corrente não é estável ao longo do tempo de medição (POLDER; PEELEN; LEEGWATER, 2008 *apud* ARAÚJO *et al.*, 2013). De fato, o registro dessa corrente não é fácil, já que vai decaindo ao longo da medição, demonstrando um comportamento capacitivo (RIBEIRO e CUNHA, 2014).

A norma ASTM G109 explica em detalhes a utilização da técnica como ferramenta para a medição da velocidade de corrosão (RIBEIRO e CUNHA, 2014). Conhecendo a corrente que flui entre o ânodo e o cátodo e recorrendo à lei de Faraday é possível determinar a velocidade de corrosão, isto é, a quantidade de metal que se corrói por unidade de área durante um certo intervalo de tempo (ANDRADE *et al.*, 2008).

Contudo, a determinação da velocidade de corrosão da armadura a partir da medição da corrente galvânica ainda não é consensual na comunidade científica. Uma das correntes de investigação defende que o fato dos sensores de corrente galvânica possuírem uma razão A_c/A_a (área do cátodo/área do ânodo) relativamente pequena não permite validar a proporcionalidade entre a intensidade de corrente medida na macrocélula e a velocidade de corrosão (ANDRADE *et al.*, 2008).

Alguns autores afirmam que, quando ambos os metais da célula de corrosão estão fortemente oxidados, a intensidade da corrente que circula na célula não é representativa do estado de corrosão em que se encontram as armaduras. A justificativa para esse argumento parte do princípio de que uma célula de corrosão pressupõe a existência de um ânodo e de um cátodo cuja

diferença de potencial origine a “corrente de corrosão”. No caso de ambas as armaduras estarem claramente oxidadas de uma forma uniforme ambas se comportarão como ânodos e, por isso, não haverá formação de célula de corrosão entre as duas armaduras (RIBEIRO e CUNHA, 2014).

Na realidade a corrente galvânica medida numa macrocélula representa apenas parte da corrente de corrosão, motivo pelo qual a determinação da velocidade de corrosão a partir da corrente galvânica não é exata (ANDRADE *et. al.*, 2007; ANDRADE *et. al.*, 2008).

2.4.2.1 Fatores que influenciam na corrente galvânica

A corrente galvânica formada durante a corrosão de uma macrocélula depende não só dos processos anódicos e catódicos ($U_C - U_A$) mas também da resistência anódica (R_A), resistência catódica (R_C) e da resistência do eletrólito (R_{EL}). Significa por isso, que a intensidade de corrente que flui entre o ânodo e o cátodo, colocados em contato através do meio eletrolítico, pode apresentar valores bastante baixos também no caso do teor de oxigênio do eletrólito ser muito baixo ($R_C \rightarrow \infty$) ou no caso do concreto se encontrar bastante seco ($\rho \rightarrow \infty$) (RAUPACH *et al.*, 2001; ANDRADE *et al.*, 2008).

O teor de oxigênio determina inclusive a distância entre o ânodo e o cátodo. Normalmente, o cátodo é instalado próximo do ânodo, em região de concreto aerado, em que há acesso de oxigênio. No caso de o concreto da região estar sujeito à saturação por longos períodos (como em componentes submersos e expostos à variação de maré), em que já há naturalmente restrição do acesso de oxigênio, a distância entre o ânodo e o cátodo deve ser maior, visto que há consumo de parte do oxigênio pelo cátodo. No caso de concretos de baixa resistividade elétrica, a distância entre o ânodo e o cátodo pode chegar a alguns metros (MCCARTER e VENNESLAND, 2004).

Então, além de a magnitude da corrente galvânica ser influenciada pelo valor da diferença de potencial dos eletrodos submersos em um eletrólito e pela cinética do ânodo e do cátodo, também é afetada pela resistividade do eletrólito e o teor de oxigênio disponível, uma vez que a reação no cátodo consome oxigênio. Esses fatores, alta resistividade elétrica e restrição da quantidade de oxigênio, podem reduzir a corrente galvânica a zero (HUAUFU *et al.*, 2015).

2.4. SENSORES DE CORROSÃO

Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM, 2012), publicado pelo INMETRO, um sensor é um instrumento que é diretamente afetado por um fenômeno, corpo ou substância que carrega a quantidade a ser medida e converte em um sinal que pode ser lido por um observador ou um instrumento.

Os sensores podem ser divididos em duas categorias relativas à escala, os pontuais ou discretos e os contínuos ou distribuídos (CUSIC e INAUDI, 2007 *apud* NERY, 2013). O sensor pontual é usado normalmente em situações onde a ação do agente de degradação é homogênea ou próxima disso, por exemplo, frente de carbonatação em uma face de uma peça estrutural. O sensor distribuído tem seu uso justificado nos casos onde é de suma importância a identificação do local no qual o dano é causado ou quando o dano pode se apresentar apenas em um ponto da estrutura e é importante cobrir um maior número de pontos (NERY, 2013).

Dependendo do sistema de coleta de dados utilizados, os sensores permitem um monitoramento periódico ou contínuo (ALMEIDA *et al.*, 2011). Os equipamentos que são portáteis necessitam de visitas periódicas para a mensuração da corrosão. Já os fixos possuem maior precisão, e podem precisar de softwares e hardwares complexos e mais caros (LACERDA e MULLER, 2015). Porém, permitem um monitoramento contínuo.

Estes sensores fixos para o monitoramento do risco de corrosão em estruturas novas são posicionados sobre as armaduras antes da concretagem e em estruturas existentes são introduzidos em furos realizados ao longo da espessura do concreto de cobertura da armadura. Na sequência são explicados os sensores de corrente galvânica e os sensores de potencial de corrosão.

2.4.1 Sensor galvânico

Eventos de corrosão localizada podem acontecer em questão de segundos. Sendo assim, se a corrosão localizada é o fenômeno de interesse, um sensor galvânico é provavelmente a melhor opção (KLASSEN e ROBERGE, 2008). Esses sensores para avaliação do risco da corrosão em estruturas de concreto fundamentam-se no monitoramento da variação da corrente galvânica em uma macrocélula formada por dois metais com potenciais elétricos diferentes, colocados em contato através de um eletrólito, por exemplo o concreto (ANDRADE *et al.*, 2008) o que forma uma célula galvânica.

Os componentes de uma célula galvânica, pilha ou bateria são: (i) os compartimentos: as duas metades da célula; (ii) os eletrodos: superfícies onde ocorrem as reações; (iii) as semi-pilhas: cada eletrodo e o meio onde está imerso; (iv) o circuito externo: circuito elétrico que conecta os eletrodos e permite o escoamento de elétrons através do circuito (ANGST e BUCHLER, 2015). Assim, tal método de monitoramento utiliza um amperímetro de resistência zero, conhecido também, como técnica Zero-Resistance Ammeter (ZRA) (LACERDA e MULLER, 2015).

Na prática, para a avaliação do risco de corrosão nas estruturas de concreto, os sensores galvânicos constam de um conjunto de barras de aço-

carbono, eletricamente isoladas. Com o embutimento do sensor no concreto, essas barras ficam posicionadas em diferentes profundidades, sempre menores do que a da armadura. Esse conjunto de barras do sensor é também denominado de ânodo. Na proximidade do ânodo, é embutida a mencionada barra de metal mais nobre, denominada de cátodo. Em geral, como cátodo, utilizam-se aços inoxidáveis altamente resistentes à corrosão e aos íons cloreto, ou ainda titânio revestido com platina ou com mistura de óxidos de metais nobres (MMO) (ARAÚJO *et al.*, 2013).

Existem vários tipos de sistemas de macrocélulas usados para monitorar o avanço da corrosão do reforço em estruturas de concreto ou o tempo até a iniciação da corrosão usando um ou múltiplos ânodos em profundidades diferentes (chamados arranjos de escada) (MCCARTER e VENNESLAND, 2004). Esse último tipo de arranjo é mostrado na Figura 2.

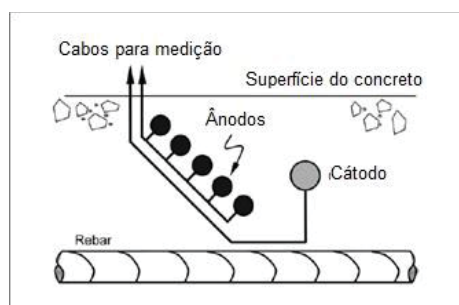


Figura 2: Arranjo de escada de múltiplos ânodos. Fonte: Mccarter e Vennesland (2004).

Por definição, em uma macro-célula, o ânodo e o cátodo são espacialmente separados e o termo "macro" tenta indicar que a distância entre ânodo e cátodo é de natureza macroscópica e pode atingir vários decímetros (ANGST e BUCHLER, 2015).

Quando se usa esse tipo de arranjo mostrado na Figura 2, o processo corrosivo nas barras que atuam como ânodo ocorre gradativamente, conforme o avanço da frente de agentes agressivos no concreto de cobrimento. Sendo assim, a corrente galvânica aumenta no sentido da barra que foi embutida mais próxima à superfície do concreto para a barra embutida em maior profundidade. Esse avanço de agentes é devido, geralmente, ao ingresso do dióxido de carbono, que diminui o pH da solução de poros (carbonatação), ou ao ingresso de íons cloretos em teores críticos para a despassivação do aço (ARAÚJO *et al.*, 2013).

Dessa forma, a medição da corrente galvânica criada entre os ânodos, instalados a diferentes profundidades da camada de recobrimento, e o cátodo permite conhecer o instante em que ocorre a despassivação do metal que funciona como ânodo por contaminação do concreto. O monitoramento permanente da corrente galvânica nos sucessivos ânodos permite assim, conhecer a profundidade de penetração dos agentes agressivos e, utilizando

modelos de previsão da vida útil, estimar o período de iniciação da corrosão nas armaduras da estrutura (ANDRADE *et al.*, 2008).

Quando a frente de desp passivação é detectada nos ânodos do sensor de corrente galvânica a diferentes profundidades, pode ser decidida a aplicação de sistemas de proteção adicionais como a aplicação de revestimentos de proteção (PEREIRA e SALTA, 2012). Sendo este um meio para dar suporte a elaboração de um plano de manutenção preventiva da edificação onde os sensores tenham sido instalados.

Segundo Araújo *et al.*, (2013), o número de fornecedores comerciais dos sensores de corrosão ainda pode ser considerado limitado. Alguns sensores disponíveis no mercado são os seguintes:

- Sensor escada (*Anode Ladder*) e sensor de anéis expansivos (*Expansion Ring Anode*), ambos da empresa *Sensortec*;
- Sensor de múltiplos elétrodos (*CorroWatch Multisensor*), da empresa *Force Technology*;
- Sensor 900 (*Concrete Multi-Depth Sensor, Model 900*), da empresa *Rohrback Cosasco Systems*.

Romanos *et al.* (2013) descreve outro sensor, o Monlcorr^{Pat.Pend}, que consiste em um conjunto de barras, através das quais é possível determinar a: (a) taxa de corrosão do aço de reforço pela técnica LPR e (b) corrente galvânica entre as hastes de aço carbono e aço inoxidável (SS) e (c) a condutividade do concreto entre as duas barras SS.

Por meio do sensor de múltiplos elétrodos (*CorroWatch Multisensor*) se determina a corrente galvânica e o potencial de circuito aberto das barras do ânodo com o ajuda do eletrôdo de referência ERE20 (Mn/MnO₂) embutido na sua proximidade, e a temperatura do concreto por meio de elétrodos específicos embutidos na base do sensor (FORCE TECHNOLOGY, 2012; ARAÚJO *et al.*, 2013).

No sensor de múltiplos elétrodos, as barras do ânodo são retas e estão posicionadas em altura e ângulos diferentes em relação a uma base circular. Neste sensor, uma tela de titânio ativado, fixada na base de apoio das barras do ânodo, é usada como cátodo (FORCE TECHNOLOGY, 2012; ARAÚJO *et al.*, 2013). Também existe um cabo que permite realizar uma ligação à armadura da estrutura para que esta funcione como último ânodo do sensor.

Assim sendo, quando esse sensor é instalado de forma isolada numa estrutura, admite a realização de 5 medições de intensidade de corrente galvânica (ANDRADE *et al.*, 2008). O sensor de múltiplos elétrodos foi desenvolvido para o monitoramento do risco de corrosão em construções novas,

como túneis, pontes, píeres, fundações e outros tipos de construções (FORCE TECHNOLOGY, 2012; ARAÚJO *et al.*, 2013).

Nota-se que para evitar a corrosão das barras de aço-carbono do ânodo dos sensores apresentados para uso em obras novas, a sua instalação deve ser feita momentos antes do lançamento do concreto. Além disso, as barras do ânodo e o cátodo dos sensores apresentados devem estar isolados eletricamente da armadura (ARAÚJO *et al.*, 2013).

Finalmente, cabe mencionar que é esperada a degradação prematura do concreto de cobrimento no local de embutimento do sensor galvânico. Isso é válido para aqueles em que barras de aço-carbono do ânodo são posicionadas em baixa profundidade no concreto de cobrimento. Com a evolução da corrosão dessas barras, há perigo de fissuração e deslocamentos do concreto. Para evitar que a intensificação da corrosão das barras superficiais resulte na degradação do concreto, sistemas de proteção catódica podem ser usados. Essa proteção é feita com a instalação de bateria externa conectada às referidas barras (SCHIESSL; RAUPACH, 1992 *apud* ARAÚJO *et al.*, 2013).

2.4.1.1 Potencial do par (E_{PAR})

Um par galvânico é um tipo de semi-eletrodo de referência. Porém, contrariamente aos tradicionais eletrodos de referência, os sensores galvânicos não estão baseados em reações termodinamicamente reversíveis, em lugar disso, consistem em pares bi metálicos que mantem um potencial estável por um período finito. A sua estabilidade é baseada no meio ambiente específico do concreto e pode ser explicado e calibrado baseando-se na teoria eletroquímica (PAWLICK *et al.*, 1998).

Teoricamente, o potencial de um par (E_{PAR}) é resultado da combinação dos potenciais dos metais envolvidos é determinado pelo ponto onde a corrente anódica ou de oxidação é igual à corrente catódica ou de redução; esta condição leva à polarização de ambos os metais para um potencial combinado (E_{PAR}) e assegura a estabilidade desse último no tempo.

A polarização pode ser definida como o deslocamento de um potencial do seu valor de equilíbrio como resultado de um determinado processo. Com a formação do par galvânico o eletrodo que recebe elétrons (cátodo) passa a sofrer uma polarização catódica. Já o eletrodo que doa elétrons (ânodo) é polarizado anodicamente (SOUZA, 2014).

A polarização devido à formação de um par galvânico depende da diferença do potencial de equilíbrio entre os dois eletrodos. Assim quanto mais nobre for um potencial em relação ao outro, isto é quanto maior seja a resistência de corrosão entre eles, mais intensa tende a ser a polarização (SOUZA, 2014). Por tanto, a pilha é mais reativa quanto maior for esta diferença de potencial (FERNANDES e MARTENDAL, 2015).

Com base no explicado, o potencial do par (E_{PAR}) se determina a partir da diferença entre o potencial positivo correspondente ao cátodo e o potencial negativo correspondente ao ânodo conforme a Equação 3.

$$E_{célula} = E_{cátodo} - E_{ânodo} \quad (3)$$

Onde $E_{cátodo}$ é o potencial de polarização do cátodo e $E_{ânodo}$ é o potencial de polarização do ânodo. Sendo que se $E^{\circ}_{célula} > 0$, então o processo é espontâneo (célula galvânica) e se $E^{\circ}_{célula} < 0$, então o processo é não-espontâneo (célula eletrolítica) (PAWLICK *et al.*, 1998).

De acordo com Sousa (2014), quando um eletrodo que estava em equilíbrio é polarizado, as densidades de corrente anódica e catódica deixam de ser iguais passando a ocorrer o predomínio do processo de redução ou do processo de oxidação.

Quando o eletrodo é polarizado de tal maneira que a densidade de corrente anódica (i_a) passa a ser superior que a densidade de corrente catódica (i_c) a polarização é denominada anódica. Portanto a densidade de corrente total (i) que circula no eletrodo será positiva, conforme a Equação 4.

$$i = i_a + (-|i_c|) > 0 \quad (4)$$

Como resultado, o processo de oxidação passa a predominar sobre o processo de redução e o eletrodo anódico tende a sofrer corrosão. Para fins de projeto de um sensor galvânico, a polarização anódica do sistema se torna um objetivo fundamental já que para monitorar a corrosão é necessário que a reação entre os metais no sensor seja ativa.

Por outro lado, como resultado da polarização catódica o processo de redução passa a predominar sobre o processo de oxidação e na medida que a polarização vai se intensificando o eletrodo passa a sofrer apenas redução. A densidade de corrente catódica passa a ser superior à densidade de corrente anódica e, portanto, a densidade de corrente total (i) que circula no eletrodo será negativa, conforme a Equação 5. Os valores negativos indicam que o ânodo não está em processo de corrosão ativo.

$$i = i_a + (-|i_c|) < 0 \quad (5)$$

Sendo E_{eq} o potencial de equilíbrio irreversível do eletrodo e η o sobrepotencial já seja anódico ou catódico segundo o tipo de polarização, define-se teoricamente o potencial de polarização como $E = E_{eq} \pm \eta$.

Como nenhuma corrente é aplicada à macrocélula galvânica, o potencial de polarização dos eletrodos é sempre no intervalo do potencial natural dos metais no concreto (MCCARTER e VENNESLAND, 2004). Por tanto, oscilará em função das condições do meio, as quais determinaram que se o sobrepotencial (η) se move na direção anódica ou catódica.

Para determinar o potencial de equilíbrio irreversível dos eletrodos usa-se um eletrodo de referência, por exemplo, um eletrodo padrão de hidrogênio. Os potenciais do eletrodo obtidos dessa forma são convencionalmente definidos como potenciais de redução ou potencial de eletrodo padrão e estão em função do meio no qual o eletrodo se encontra imerso. Por causa disso, existem tabelas que agrupam os valores de potenciais dos metais em diferentes meios que simulam ambientes reais, por exemplo a água do mar. Ditas tabelas de potenciais são conhecidas como séries galvânicas.

O potencial de equilíbrio irreversível indica a tendência do eletrodo de sofrer redução ou oxidação em um meio determinado, quanto maior o potencial de corrosão do eletrodo em uma tabela de potenciais maior a tendência do eletrodo a sofrer oxidação, isto é, se comportar como ânodo. Por tanto, pode ser usado como referência para escolher os metais que vão compor o sensor galvânico.

O potencial de corrosão do aço comum, imerso em um eletrólito simulando a água do mar com relação a um eletrodo de referência de calomelano saturado está no intervalo de $(-0,61 \text{ a } 0,72) \text{ V}$, entretanto o potencial de corrosão do cobre está intervalo de $(-0,28 \text{ a } 0,36) \text{ V}$.

2.4.1.2 Influência da área dos eletrodos na estabilidade de carga no sensor

A diferença entre o potencial de polarização do ânodo e o potencial de polarização do cátodo será o potencial de referência do sensor galvânico em estado estacionário (E_{par}). Teoricamente, o sensor galvânico deve ser capaz de manter estável o seu potencial durante um intervalo de tempo finito considerado como o período de vida útil do par. A estabilidade ao longo do tempo do potencial do sensor é influenciada, entre outros fatores, pelas densidades de corrente anódica e catódicas.

Entretanto, as correntes anódicas e catódicas são função da área do ânodo e da área de cátodo, respectivamente. Por exemplo, para a mesma densidade de corrente um ânodo de 1 cm^2 vai produzir menos corrente total que um ânodo de 10 cm^2 . O efeito da área no potencial do par segue a tendência da teoria de mistura de potenciais, a qual expõe que um cátodo de grande área pode conduzir o potencial do par para valores mais nobres. De maneira semelhante, um ânodo com uma área grande tende a mover o potencial do par na direção ativa (PAWLICK *et al.*, 1998).

Sendo assim, se o ânodo tem área insuficiente, o potencial do par vai mudar para valores mais nobres com um limite superior representado pelo potencial de circuito aberto do metal que atua como cátodo. Com a elevação da área do cátodo em relação ao ânodo, aumenta a demanda por elétrons do cátodo, enquanto a área do ânodo a partir da qual os elétrons serão fornecidos diminui e, portanto, a taxa de dissolução do ânodo aumenta (SOUSA, 2014).

Nestas condições, existe o risco que o ânodo se degrade excessivamente e diminua o período de vida útil do sensor.

Não entanto, de acordo com Pawlick *et al.* (1998) é a relação entre a área do ânodo e do cátodo (A_A/A_C) a maior responsável por manter um potencial estável. Sendo assim, o período durante o qual o potencial do par se mantém estável pode ser otimizado mudando a relação de área entre o cátodo e o ânodo.

2.4.2 Sensor de potencial de corrosão

Trata-se de um eletrodo de referência bastante estável que é instalado em região próxima à armadura, sem tocá-la, a fim de se obter os valores de potenciais de corrosão da região da armadura que está próxima ao eletrodo de referência. O objetivo do eletrodo é proporcionar uma transferência de elétrons entre o circuito e o meio no qual está inserido, desta forma é possível medir a diferença de potencial existente entre o eletrodo e a armadura. Os eletrodos podem ser feitos a partir de metais imersos em diferentes soluções saturadas como, cobre/sulfato de cobre; prata /cloreto de prata ou manganês/dióxido de manganês. Na sequência são brevemente descritos alguns eletrodos de referência a partir do trabalho de Almeida *et al.* (2011).

O eletrodo de referência de Cu/CuSO₄ é fabricado a partir de uma solução de 40g de CuSO₄.5H₂O em 25ml de água destilada. Para sua confecção em laboratório é necessária uma barra de cobre mergulhada numa solução saturada de sulfato de cobre com cristais de sulfatos de cobre precipitados dentro de um reservatório de plástico com uma base porosa (madeira ou cerâmica) e um material de isolamento no extremo superior.

Os eletrodos de referência (Ag/AgCl), podem ser produzidos em laboratório a partir de uma haste de prata, revestida com fina camada de cloreto de prata através de processo de eletrodeposição ou mergulho em solução. Comercialmente são fabricados utilizando o mesmo princípio, mas diferentes geometrias.

Os eletrodos de dióxido de manganês, também conhecidos comercialmente como ERE 20, apresentam baixo custo, elevada vida de serviço podendo ultrapassar os 30 anos e são de fácil produção. Seu funcionamento não é influenciado por mudanças nas características do concreto, podendo ser empregados em concretos secos ou molhados assim como expostos a ambientes com cloretos ou carbonatados (FORCE TECHNOLOGY, 2012), ou seja, se caracterizam por ser muito estáveis.

Esses eletrodos são feitos a partir de uma meia-célula de dióxido de manganês, dentro de uma cápsula de aço inoxidável com ponta porosa, envolto por uma solução alcalina (FIGUEIREDO, 2010 *apud* ALMEIDA *et al.*, 2011) As soluções alcalinas são aquelas com pH acima de 7. A ponta porosa, feita de

material cimentício e fibras, é responsável pelo contato eletrolítico da solução alcalina com o concreto, fazendo com que o circuito aço-eletródo seja fechado. O funcionamento deste sensor é satisfatório para temperaturas no intervalo de -10 °C a +40 °C e podem ser instalados em qualquer posição ou quantidade necessária. Em estruturas novas podem ser amarrados à armadura com fitas não metálicas e em estruturas já existentes são inseridos em furos feitos no concreto (ALMEIDA *et al.*, 2011).

De maneira geral, quando estes eletrodos são usados como sensores de corrosão, são revestidos por uma malha plástica não condutora o que garante que não haja contato entre o aço e o eletrodo, mas assegura a suficiente proximidade entre eles de maneira que não existam interferências nas leituras. O monitoramento pode ser efetuado com um voltímetro de alta impedância ao qual são conectados tanto a armadura investigada, como o eletrodo de referência que é inserido no concreto. Também pode ser medido usando sistemas de aquisição de dados para coleta contínua. Apesar de estes sistemas terem sido desenvolvidos para medidas de potencial, nada impede que sejam usados também para medidas de corrente galvânica ou resistência à polarização (ALMEIDA *et al.*, 2011).

As pontes rodoviárias representam o principal grupo de estruturas propensas a problemas de deterioração pelo que é difícil generalizar sobre a localização de sistemas de sensores, assim como o número e o tipo de sensores utilizados. Suas localizações reais dentro da estrutura não só dependem dos detalhes de projeto da ponte, mas também dos custos de monitoramento. Geralmente, no entanto, os sensores devem ser instalados nos seguintes locais: (i) onde a exposição ao sal de degelo é mais elevada; (ii) em locais estruturalmente críticos se estes forem expostos ao sal de degelo e (iii) em locais expostos à chuva, mas não ao sal de degelo, que atuam como controles (MCCARTER e VENNESLAND, 2004). Porém, tais critérios podem ser generalizados a todos os agentes agressivos e não somente aos sais de degelo.

Para definir os locais exatos para aplicação dos sensores devem ser levadas em consideração as condições ambientais e de uso da estrutura, o tempo de aplicação, a tecnologia do sistema e a durabilidade exigida. O maior desafio na definição do local de aplicação é encontrar a melhor forma de instalar os sensores na estrutura conseguindo a maior representação possível do dano, com o menor número possível de sensores. Para isto, o projetista deve fazer uso de métodos estatísticos, simulação numérica, experiência própria, etc. (NERY, 2013).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 ETAPAS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental teve duas etapas:

Primeira etapa: Análise de dois sensores com igual composição: Sensor A e Sensor B. Estes foram submetidos a duas condições de exposição diferentes: -embebidos em uma solução de Ca(OH)_2 simulando a solução intercapilar do concreto em condições normais e com adição de 3,5% de NaCl em massa a temperatura ambiente para representar um meio com o teor de contaminação por íons cloretos semelhantes à maioria das águas do mar, em concordância com o exposto pelos autores Mehta e Monteiro (2006).

Segunda etapa: Análise de 16 sensores instalados em corpos de prova de concreto armado com diferentes tempos de cura e resistência à compressão.

3.1.1 Parâmetros fixados

Para estudar a eficiência dos sensores de corrosão, foco da pesquisa, foi necessário fixar alguns parâmetros.

- 3,5% de NaCl em massa para contaminar a água onde os corpos de prova de concreto foram parcialmente imersos com o intuito de acelerar o processo de corrosão da armadura;
- Espessura de cobrimento para a armadura principal dos corpos de prova, a saber: 3 cm na face exposta ao ar, 4 cm nas faces laterais e 6 cm na face exposta à água contaminada com íons cloretos. Se usou como referência a norma NBR 6118:2015;
- Processo de cura do concreto: cura por imersão de acordo com a norma NBR 5738:2003;
- Consistência do concreto determinada pelo abatimento do tronco de cone “slump”: 80 ± 10 mm segundo a NBR 7223: 1992; de forma a manter uma consistência plástica para a moldagem de todos os corpos de prova;
- Características do aço de reforço: barras corrugadas de CA 50 de diâmetro 6,3 mm (1/4”).

3.1.2 Variáveis independentes

As variáveis independentes usadas para testar o sensor de corrosão, objeto de pesquisa, foram as que estão apresentadas a seguir:

- Tempo na cura úmida a partir da data de moldagem: 1 e 91 dias;
- Relação água/cimento do concreto: 0,46 e 0,75;
- Resistência à compressão do concreto: 15 e 30 MPa.

3.1.3 Variáveis dependentes

As variáveis dependentes são as variáveis de leitura, ou seja, são os parâmetros utilizados como variáveis de resposta. As variáveis estudadas neste estudo estão representadas a seguir:

No aço:

- Diferença de potencial entre a armadura de reforço, medida em relação a um eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO_4) (E_{corr});
- Corrente galvânica através do sensor embebido no concreto (I_{gal});
- Potencial dos pares do sensor (E_{par})

No concreto:

- Absorção de água por sucção capilar;
- Profundidade de penetração dos íons cloretos pelo método colorimétrico.

3.2. CONFIGURAÇÃO DO SENSOR

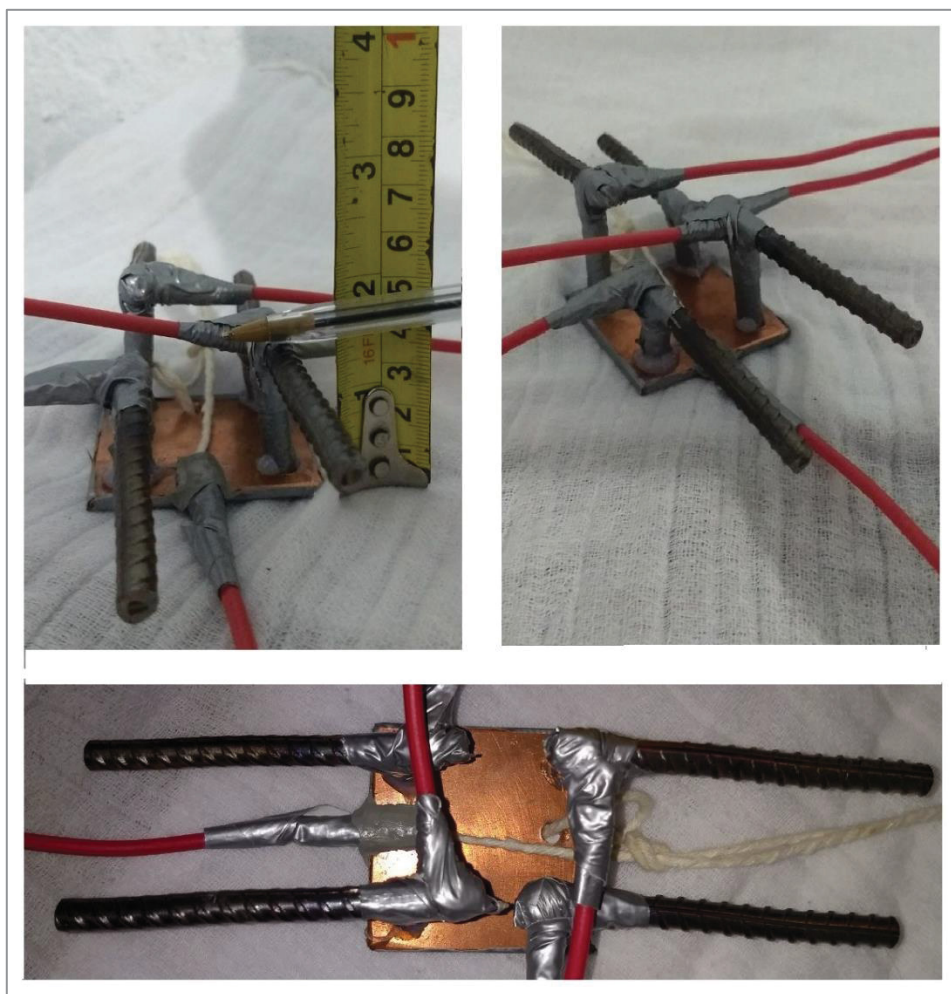
A macro célula galvânica do sensor considerada neste estudo é formada por cobre e aço carbono dispostos num formato semelhante ao sensor galvânico *CorroWatch da Force Technology*. Foram usadas barras de aço-carbono de 60 mm de comprimento e diâmetro 6,3 mm (1/4") (ânodo) a diferentes alturas e instalados sobre uma placa de cobre (cátodo) de 50 por 50 mm e 4 mm de espessura. Nas conexões elétricas foi utilizado cabo de cobre isolado com filme de PVC soldado aos metais envolvidos com seção transversal de 2,5 mm². As barras de aço carbono foram fixadas na placa de cobre com resina para solda a frio. Todos os metais foram polidos com escova com fios de aço. Em seguida, foram enxaguados com água destilada, imersos em álcool e secos ao ar. Ver Figura 3 e Figura 4.

Figura 3: Processo de montagem do sensor. (a) Polimento com escova de fios de aço; (b) Imersos em álcool para posteriormente ser secos ao ar; (c) Solda das conexões elétricas; (d) e (e) Cobrimento das conexões elétricas com filme de PVC; (f) Montagem.



Fonte: Autor (2018)

Figura 4: Sensor galvânico montado.



Fonte: Autor (2018)

Considerando tudo o explicado anteriormente com relação à influência da relação A_c/A_a no potencial do par E_{par} , a área da placa de cobre que atua como cátodo no sensor galvânico projetado no trabalho foi configurada de maneira que fosse igual à somatória das áreas dos ânodos que compõem a macro-célula galvânica, como indica a Tabela 3.

Tabela 3: Relação A_c/A_a .

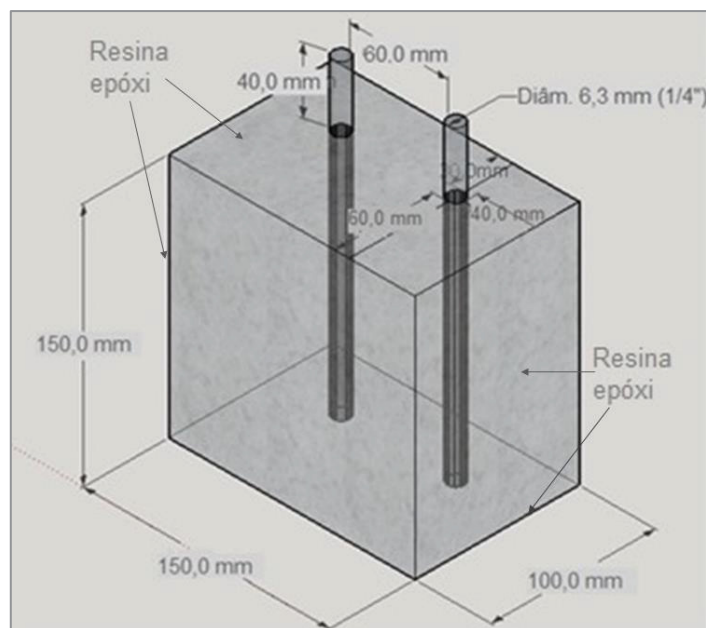
ÁREA	VALOR [mm ²]	A_c / A_a
Área exposta da placa	2500	0,97
Área dos furos na placa	942	
Área efetiva do cátodo (A_c)	1558	
Área de um ânodo (A_a)	1607,68	

Fonte: Autor (2018)

3.3. CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

Os corpos de prova utilizados para as leituras eletroquímicas testando o sensor proposto tiveram formato prismático com dimensões: (15 x 15 x 10) cm, e duas barras de aço CA-50 de diâmetro de 6,3 mm (1/4") colocadas no interior da forma paralelamente uma em relação à outra, como indica a Figura 5.

Figura 5: Esquema do corpo de prova prismático.



Fonte: Autor (2018)

O cobrimento da armadura foi definido usando como referência a NBR 6118:2015. As OAEs ou algumas das suas partes podem estar expostas a condições de exposição muito fortes (Classe IV), sendo assim, o cobrimento mínimo (c_{min}) indicado pela norma na Tabela 7.2 é de 50 mm, assumindo que os corpos de prova sejam representativos de uma viga ou pilar.

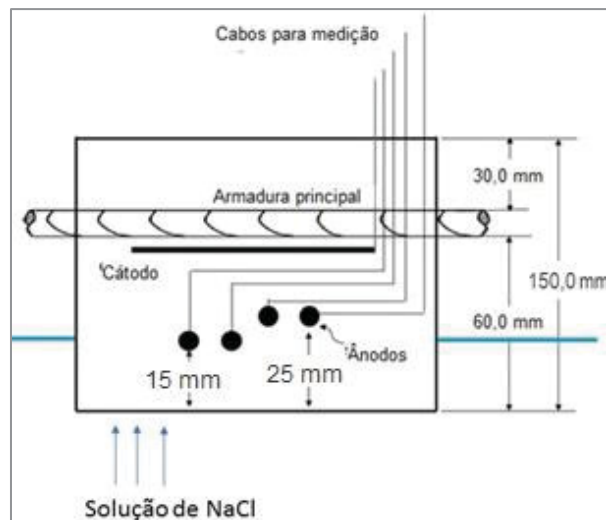
Neste contexto, o cobrimento da armadura principal com relação à superfície do corpo de prova, exposta à solução de NaCl, foi de 60 mm. Desse modo, dois dos ânodos do sensor ficaram numa profundidade de 15 mm e os dois restantes numa profundidade de 25 mm, sendo essas as profundidades nas quais o sensor deve produzir a informação de despassivação da armadura pelo ingresso de cloretos, como indica a Figura 6.

Nas faces laterais dos corpos de prova, as barras têm o cobrimento de 4 cm e na superfície exposta ao ar o cobrimento de 3 cm, conforme mostrado na Figuras 5.

As superfícies laterais dos corpos de prova foram isoladas da exposição a cloretos com uma tinta epóxi com a intenção de fazer com que a frente de

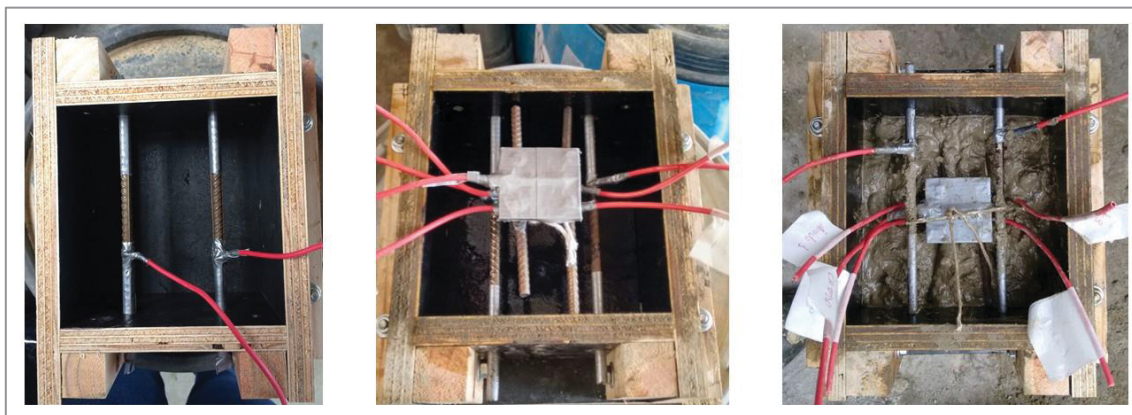
contaminação só avance pela face com o cobrimento de 6 cm. A Figura 7 mostra a moldagem dos corpos de prova prismáticos e instalação do sensor.

Figura 6: Profundidades dos ânodos no corpo de prova de concreto.



Fonte: Autor (2018)

Figura 7: Moldagem dos corpos de prova prismáticos e instalação do sensor.
(a) Instalação das barras de reforço; (b) Corpos de prova lubrificados com óleo;
(c) Moldagem.



Fonte: Autor (2018)

Neste experimento foram empregadas duas proporções de mistura como indicado a seguir:

- Concreto de 15 MPa representante de um concreto estrutural de acordo com a NBR 6118:1980, de modo a simular estruturas antigas, construídas a algumas décadas. Este concreto se enquadra como de f'_{ck} de 15 MPa, considerando desvio padrão $sd = 4,0$ MPa e relação água / cimento igual a 0,75.
- Concreto de 30 MPa correspondente à Classe III (atmosfera marinha ou industrial). Este concreto se enquadra como de f'_{ck} 30 MPa, com relação $a/c = 0,45$ e $sd = 4,0$ MPa de acordo com a NBR

12655:2006 (na realidade para seguir a norma com a exposição na classe IV de agressividade adotou-se este traço de concreto, porém, a resposta foi que ele não se enquadrava como um fck de 40 MPa, como estabelece a NBR 6118:2014).

Os traços usados correspondem a concretos convencionalmente usados nas usinas de concreto da região de Curitiba e estão indicados na Tabela 4.

Tabela 4: Traços unitários usados para a moldagem dos corpos de prova.

PROPORÇÃO DE MISTURA EM MASSA	
15 MPa	30 MPa
1,00 : 4,01 : 4,12 – a/c = 0,75	1,00 : 1,85 : 2,57 – a/c = 0,45

Fonte: Autor (2018)

3.3.1 Características dos materiais

Para execução dos corpos de prova de concreto foram usados materiais usualmente empregados em obras da região de Curitiba, como indicado na Tabela 5.

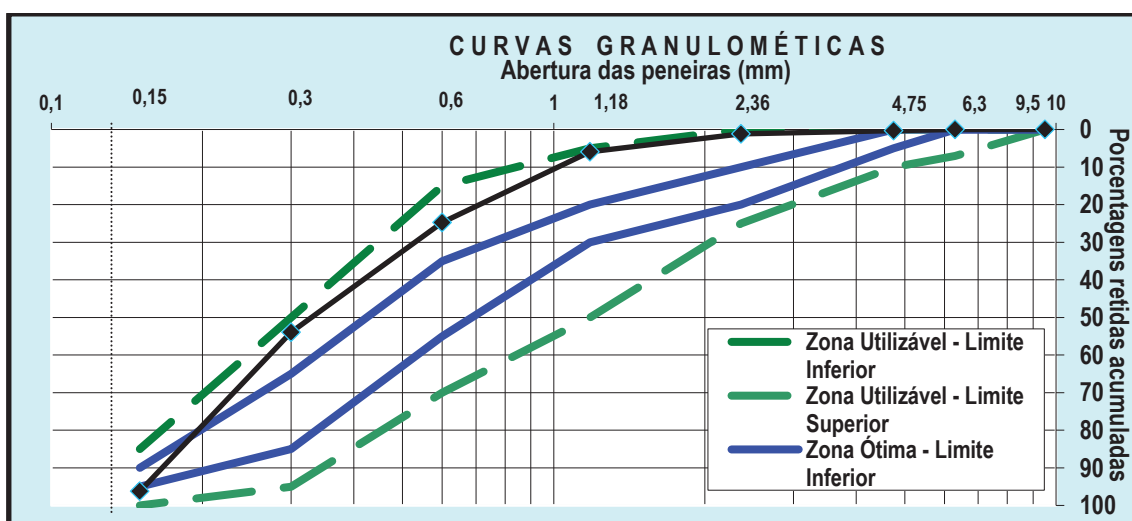
Tabela 5: Propriedades físicas dos materiais.

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS			
Aglomerante hidráulico cimento	CP II-F 32			
Agregado miúdo	Areia FINA			
	DMC	MF	TF	ME
	0,600 mm	2,40	9,06%	2,50 g/cm³
Agregado graúdo	Brita n. ° 1			
	DMC	MF	TF	ME
	19,0 mm	1, 83	0,39%	2,66 g/cm³
Água	Rede de abastecimento local			
Aço	Gerdal CA-50			
DMC: Dimensão máxima característica				
MF: Modulo de finura				
TF: Teor de finos (Material pulverulento)				
ME: Massa específica				

Fonte: Autor (2018)

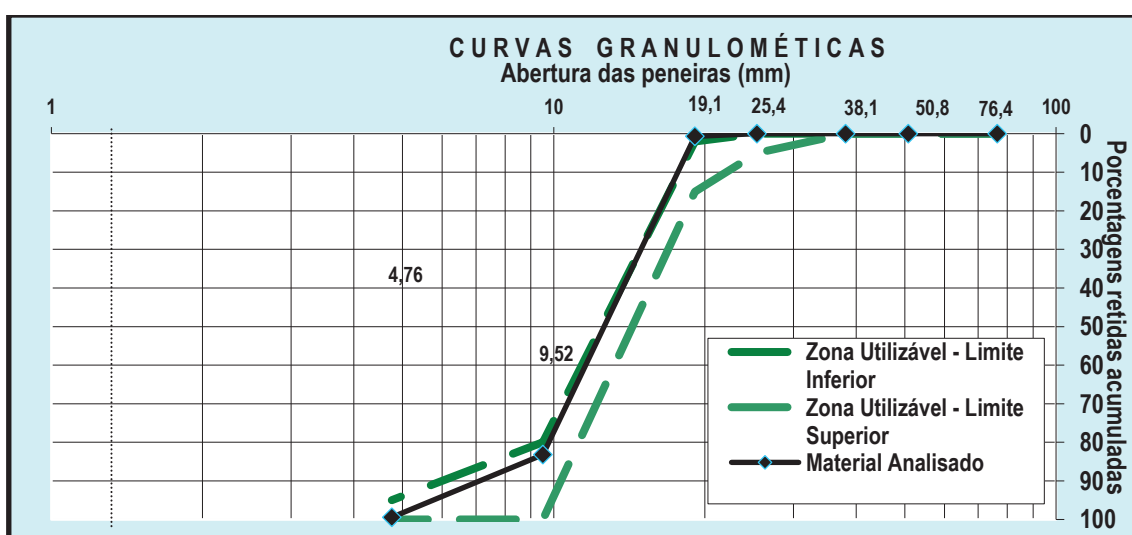
A análise granulométrica foi baseada na NM 248 (ABNT, 2003) considerando os limites propostos na NBR 7211 (ABNT, 2009). As Figuras 8 e 9 mostram as curvas granulométricas dos agregados usados para produzir o concreto.

Figura 8: Curva granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: Autor (2018)

Figura 9: Curva granulométrica do agregado graúdo.



Fonte: Autor (2018)

Segundo Ferreira (2004) a reação álcalis agregado (RAA) ocorre mais rápido em condições permanentemente úmidas, ou quando há molhamento e secagem alternados a temperaturas altas (na faixa de 10 a 38 °C). Sendo assim, já que no processo de envelhecimento acelerado os corpos de prova prismáticos ficaram expostos a 50 °C, foi avaliada a reatividade potencial dos agregados através do ensaio acelerado em barras de argamassa, conforme prescreve a ABNT NBR 15577- 4 (2009).

Se usaram dois cimentos no ensaio de RAA: o CP-II-F-32 que foi o mesmo cimento usado para a produção dos concretos considerados na segunda etapa do experimento e o CP-V como cimento padrão. Além de um pó de pedra resultado da britagem da brita que foi considerada para produção do concreto. De acordo com os resultados do ensaio, a combinação da areia e da brita moída,

com o cimento CP-II-F-32 é potencialmente inócua. O detalhamento desses resultados aparece no Anexo C.

3.3.2 Armaduras de aço carbono e limpeza

Conforme descrito anteriormente, as barras de aço empregadas nos corpos de prova e no sensor galvânico são do tipo CA 50, com 6,3 mm de diâmetro, corrugadas. Para diminuir a variabilidade na análise, as barras de aço passaram por um processo de limpeza. Alguns dos métodos para a remoção de impurezas metálicas são: detergência, solubilização, ação química e ação mecânica, que podem ser usados de forma isolados ou em conjunto (OLIVEIRA, 2012). O processo de limpeza utilizado nesta pesquisa combinou os métodos de solubilização e ação mecânica como relatado a seguir:

- A) Remoção dos óxidos da superfície metálica pelo processo de abrasão até ficar limpa a superfície de impurezas. Para isso foi usada uma escova de cerdas metálicas;
- B) Enxague com água destilada e posterior imersão em álcool;
- C) Secagem com papel toalha e ar quente.

A ação mecânica pode ser manual ou mecanizada, ou seja, por jateamento mecânico. O método de solubilização é aplicado quando existem óleos de natureza simples ou graxos com baixo grau de contaminação, sendo possível utilizar solventes para a sua remoção (OLIVEIRA, 2012). Na pesquisa atual, foi usada água destilada e álcool, já que as barras não apresentavam óleos na superfície, nem produtos de corrosão.

Nappi *et al.* (2013) limpam elementos metálicos antes da confecção dos corpos de prova seguindo o processo estabelecido pela norma NBR 6210:2008 “Corrosão Atmosférica-Materiais Metálicos-Preparo, limpeza e determinação da taxa de corrosão de corpos de prova em ensaios de corrosão”. Os autores utilizaram a ação mecânica para desengraxar, tendo em conta que os elementos metálicos que iriam usar não tinham produtos de corrosão na superfície. Posteriormente, os enxaguaram com água corrente, os mergulharam em solvente e finalmente os secaram com jatos de ar limpo. Isso evidencia que para a limpeza de barras de aço, empregadas em estudos de corrosão, a ação mecânica combinada com um enxague, é utilizada.

3.3.3 Moldagem dos corpos de prova

A consistência do concreto foi controlada pelo abatimento do tronco de cone, conforme recomendações da NBR 7223:1992. Após umedecer o molde, foi enchido em três camadas, cada uma com aproximadamente um terço da altura do molde compactado. Foram aplicados 25 golpes com a haste de socamento para compactar cada camada. Este ensaio foi realizado em todos os

concretos utilizados com o intuito de se obter valores aproximados de abatimento do tronco de cone, mantendo sempre uma consistência plástica.

O adensamento do concreto nos corpos de prova foi efetuado manualmente com a própria haste empregada no ensaio de consistência, foram efetuados 15 golpes por camada. Os moldes foram enchidos em três camadas. Antes de proceder a moldagem dos corpos de prova, os moldes e suas bases foram convenientemente revestidos internamente com uma fina camada de óleo mineral, seguindo recomendação da NBR 5738:2003.

Em concordância com essa mesma norma, durante as primeiras 48 horas, após a moldagem, os corpos de prova prismáticos permaneceram sobre uma superfície horizontal rígida, livre de vibrações e de qualquer outra causa que pudesse perturbar o concreto, cobertos com um material não reativo e não absorvente, com a finalidade de evitar perda de água do concreto, neste caso, usou-se uma película de plástico. Para os corpos de prova cilíndricos, a norma estabelece 24 horas. Passado este tempo, os corpos de prova foram desmoldados e curados por via úmida imersos em água saturada com cal.

A norma sugere um período de cura em câmara úmida de 28 dias, mas para simular um concreto com estado de hidratação avançado característico de uma estrutura real que venha a sofrer a necessidade de ensaios de campo após determinada quantidade de anos de vida útil, considerou-se um período de 91 dias de cura a partir da data da concretagem para alguns dos corpos de prova.

Além disso, uma série de corpos de prova foram submetidos a cura de 1 dia representando uma estrutura nova, imediatamente depois da construção, e com cura deficiente. Considerações semelhantes foram realizadas no trabalho de Rocha (2012) e por Dotto (2006).

Após o período de cura, as amostras foram codificadas e encaminhadas para início do monitoramento do fenômeno através das técnicas eletroquímica previamente especificadas. Cabe salientar que não foi incorporado aditivo, nem adição alguma na dosagem das misturas, para evitar a introdução de materiais extras que possam gerar interferências indesejadas e incompreendidas nas leituras eletroquímicas consideradas.

3.3.4 Processo de envelhecimento acelerado

Para induzir a corrosão do aço embutido no concreto foi usado um processo acelerado de envelhecimento que envolve a absorção e difusão de cloretos. Esse processo seguiu um sistema de imersão parcial alternado (SIA) em ciclos. Os ciclos são compostos de secagem em estufa a 50 °C por 5 dias e imersão parcial dos corpos de prova na solução contendo íons cloreto por 2 dias. Na maioria dos trabalhos consultados na revisão bibliográfica foi usado o mesmo

sistema de imersão alternada (FREIRE, 2005; DOTTO, 2006; SILVA, 2010; ROCHA, 2012).

Neste caso, o objetivo foi reproduzir condições de serviço semelhantes a uma zona de atmosfera marinha, mais especificamente em zonas de variação de maré. Nessa região, existe o contato com água contaminada com cloretos, com ciclos de molhagem e secagem, sendo uma condição de exposição crítica em termos de corrosão de armaduras. O mecanismo principal de degradação presente nessas condições é a corrosão das armaduras pela ação dos íons cloreto (LIMA e MORELLI, 2004), que é o ataque considerado para avaliar o desempenho dos sensores nesta pesquisa.

3.4. PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

3.4.1 Primeira etapa – Testes em solução aquosa

Esta primeira etapa consistiu em um teste com dois sensores imersos em uma solução aquosa de Ca(OH)_2 . Esse foi um estudo preliminar para entender o comportamento do sensor em função da introdução dos cloretos no meio aquoso. O teste foi conduzido basicamente para entender se o sensor funcionaria antes mesmo de entrar na etapa de moldagem de corpos de prova de concreto. Foram usados dois sensores de mesma configuração e natureza para este teste, aqui denominados Sensor A e Sensor B

Nesta etapa foi mensurada a diferença de potencial (E_{par}) entre os metais envolvidos com o intuito de determinar o potencial de cada um dos sensores avaliados com e sem a presença de íons cloretos. Nesta oportunidade também foi mensurada a corrente galvânica (I_{gal}).

Determinou-se o peso de cada um dos sensores (Tabela 6) antes de submergi-los na solução saturada de Ca(OH)_2 usando uma balança de precisão de 0,1 g. A solução saturada de Ca(OH)_2 foi preparada com água destilada e hidróxido de cálcio P.A Ca(OH)_2 .

O hidróxido de cálcio foi adicionado até que o pH da solução estivesse na faixa de 12 a 13. O pH da solução e a temperatura ambiente foram controlados antes de cada leitura com um Medidor de pH LUCA (210) com 90 a 100% de confiabilidade após calibração.

Tabela 6: Peso inicial dos sensores.

SENSOR	A	B
PESO [g]	209,69	207,61

Fonte: Autor (2018)

3.4.1.1 Teste do potencial do par

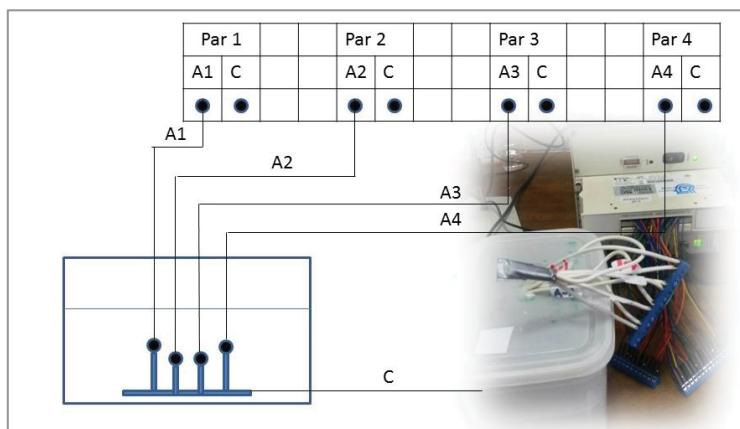
O potencial elétrico dos metais varia com a concentração, temperatura e pressão do ambiente no qual está o eletrodo. Sendo assim, não existia forma de conhecer, de forma antecipada, o potencial do par formado por aço carbono e cobre em uma solução saturada de hidróxido de cálcio com pH entre 12 e 13 e após ser contaminada com NaCl.

Com o intuito de determinar o potencial dos pares do sensor imerso na solução saturada de hidróxido de cálcio com e sem contaminação de cloreto se usou um adquiridor de dados LabVIEW 8.5; que capturou a diferença de potencial durante 40 minutos no mínimo cada vez. Considerou-se estável ao longo do tempo um par formado por ânodo-cátodo quando a diferença de potencial do par entre leituras foi menor do que 1 mV/min.

Cada um dos quatro ânodos dos sensores projetados gera uma leitura individual correspondente a um par ânodo-cátodo. Cada par é reconhecido pelo adquiridor de dados LabVIEW como um canal individual. O software associado ao equipamento registra a diferença de potencial por canal em [V/s]. A Figura 10 mostra um esquema do ensaio. No processamento dos dados se fez a conversão das leituras de [V] para [mV] e determinou-se a leitura média em [mV/min.].

O valor médio atingido neste estágio foi considerado como o potencial do sensor (E_{par}). Foi analisado se a leitura de diferença de potencial se mantém estável ao longo do tempo e o tipo de reação que indicava (galvânica ou eletrolítica).

Figura 10: Teste para determinar o potencial do par (E_{par}).



Fonte: Autor (2018)

3.4.1.2 Teste de corrente galvânica

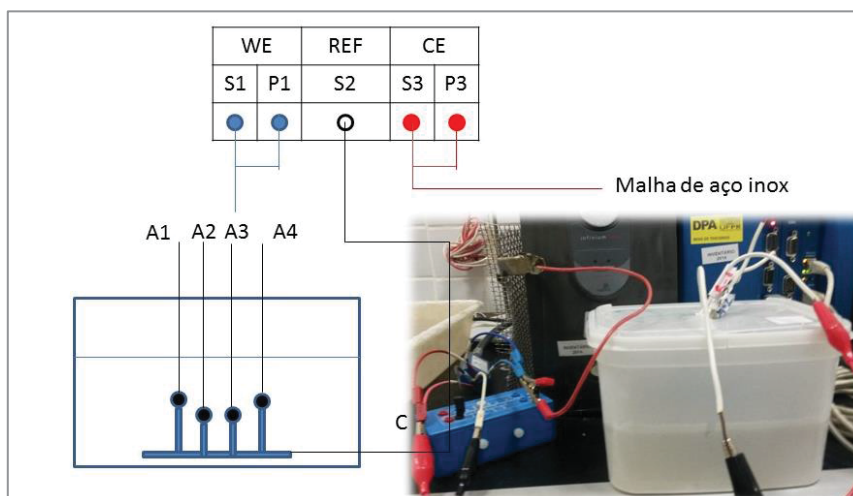
A medição da corrente galvânica geralmente se faz com um amperímetro de resistência nula, já que a corrente galvânica é da ordem de micros amperes. Por isso, foi usada a técnica eletroquímica Amperímetro de resistência nula (ZRA), com o software EC-Lab. e um potenciostato SP-200.

Esta técnica consiste na medição de corrente galvânica em um par formado por metais diferentes, sendo usada também para desempenhar alguns tipos de medições de ruído eletroquímico. Consiste em estabilizar a voltagem entre o eletrodo de trabalho (WE) e o contra-eletrodo (CE) e medir a corrente e o potencial (E_{we}) versus o eletrodo de referência (REF) (EC-LAB., 2011). A Figura 11 mostra um esquema do ensaio.

Em muitos dos casos, a corrente do par é medida entre dois eletrodos idênticos. Nas situações reais, os eletrodos são diferentes resultando em comportamento anódico em um deles e comportamento catódico no outro (EC-LAB, 2011). No sensor, os eletrodos de trabalho são as barras de aço carbono e o eletrodo de referência é a placa de cobre.

No teste imerso na solução saturada de hidróxido de cálcio contaminada com 3,5% de cloreto de sódio em massa, os sensores foram extraídos periodicamente da solução antes de cada leitura para determinar a perda de massa dos ânodos com relação ao peso original. Para isto, foram eliminados os produtos de corrosão da superfície dos ânodos dos sensores enxaguando-os com água destilada. Posteriormente, foram secos com ar quente por um período de uma hora e finalmente pesados em uma balança com 0,1 mg de precisão.

Figura 11: Ensaio de corrente galvânica (ZRA).



Fonte: Autor (2018)

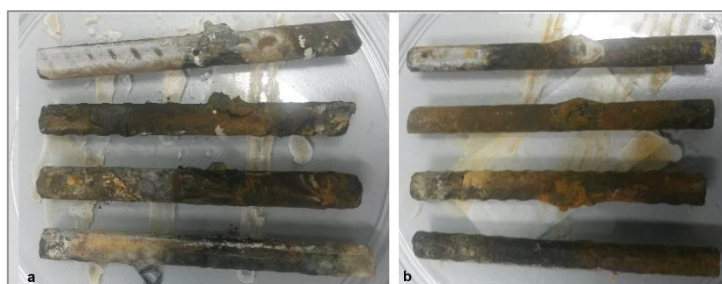
3.4.1.3 Ensaios MEV e EDS.

Foi analisada a morfologia e composição elementar da superfície das barras de aço-carbono, dos sensores, após o teste de imersão, por meio de um Microscópio eletrônico de Varredura (MEV) equipado com um sistema de espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Conjuntamente, foram obtidas imagens das barras através de um microscópio óptico com a intenção de identificar os pites.

Na microscopia eletrônica de varredura a imagem é formada pela incidência de um feixe de elétrons sobre um objeto ou amostra, sob condições de vácuo. No monitor do aparelho o que é visualizado é a transcodificação da energia emitida pelos elétrons. A energia dos fótons emitidos está diretamente relacionada ao peso atômico do elemento emissor. Desta forma, pode-se associar cada valor de energia emitida com um elemento da tabela periódica e o número de fótons emitidos com a quantidade relativa de cada elemento. Dessa forma, a técnica EDS permite realizar várias análises de composição química e obter imagens de distribuição dos elementos presentes na amostra, em áreas específicas (DUARTE *et al.*, 2003; MARTINEZ, 2010).

Para a realização desses ensaios, foi necessário desmontar os sensores galvânicos já que somente foram analisadas as barras que funcionaram como ânodos durante os testes em solução aquosa. Posteriormente, as barras foram colocadas a vácuo com o intuito de não contaminar as amostras até o momento dos ensaios. A Figura 12 mostra o estado das barras de aço-carbono instantes antes de efetuar os ensaios de MEV com EDS.

Figura 12: Amostras prontas para os ensaios de EDS e MEV. (a) Barras do Sensor B; (b) Barras do Sensor A.



Fonte: Autor (2018)

O equipamento utilizado foi um Microscópio Eletrônico de Varredura *TESCAN VEGA3 LMU*. Esse equipamento possui uma resolução de 3 nm. Permite magnificações de até 300Kx e obter imagens com pressão controlada entre 3 a 500 Pa. Com o equipamento também é possível realizar análises químicas tipo EDS (*Oxford*) com software *AZ Tech (Advanced)* com detetor tipo SDD de 80 mm².

3.4.2 Segunda etapa – Teste em corpos de prova de concreto armado

A segunda etapa, é a parte principal do programa experimental deste trabalho de dissertação, tratando do estudo em corpos de prova de concreto armado com os sensores instalados. Os corpos de prova prismáticos foram divididos em blocos segundo o tempo que ficaram na cura úmida. A Tabela 7 mostra a quantidade de corpos de prova moldados para cada combinação. Dentro de cada corpo de prova foi instalado um sensor galvânico como o apresentado na Figura 6.

- I. Primeiro bloco: 8 corpos de prova, sendo 4 com fck de 15 MPa e mais 4 com fck de 30 MPa. Tempo de cura 1 dia;
- II. Segundo bloco: 8 corpos de prova sendo 4 com fck de 15 MPa e mais 4 com fck de 30 MPa. Tempo de cura 91 dias.

Tabela 7: Corpos de prova prismáticos.

BLOCO	TEMPO DE CURA	IDENTIFICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	
		15 MPa	30 MPa
		1,00 - 4,01 - 4,12 - 0,75	1,00 - 1,85 - 2,57 - 0,46
BLOCO 1	1 dia	P - I - 15 - B1	P - I - 30 - B1
		P - II - 15 - B1	P - II - 30 - B1
		P - III - 15 - B1	P - III - 30 - B1
		P - IV - 15 - B1	P - IV - 30 - B1
BLOCO 2	91 dias	P - I - 15 - B2	P - I - 30 - B2
		P - II - 15 - B2	P - II - 30 - B2
		P - III - 15 - B2	P - III - 30 - B2
		P - IV - 15 - B2	P - IV - 30 - B2

Fonte: Autor (2018)

Nesta segunda etapa foi mensurada a resistência à compressão dos corpos de prova aos 28 dias e nas datas coincidentes com os fins dos períodos de cura. O ensaio de absorção de água por sucção capilar foi desenvolvido quando os corpos de prova chegaram ao fim do período de cura, 1 dia no caso do Bloco 1 e 91 dias no caso do Bloco 2.

A cada ciclo de exposição, as leituras foram conduzidas nos dias em que os corpos ficaram em contato com a solução com 3,5% de NaCl em massa. Além do potencial de circuito aberto, potencial do par e da corrente galvânica, foi determinado o teor de umidade de cada exemplar. Para isso, cada corpo de prova foi pesado em uma balança de 0,1 g de precisão após os 5 dias de secagem na estufa a 50 °C e em cada dia de imersão parcial.

3.4.2.1 Ensaio de resistência à compressão.

Para o ensaio de resistência à compressão foram confeccionados 3 corpos de prova cilíndricos por bloco para serem ensaiados no fim de cada período de cura e aos 28 dias. Os corpos de prova usados neste ensaio não foram contaminados.

Foram usadas almofadas de Neoprene com reforço metálico como apoio das faces dos corpos de prova de forma a manter a planicidade das faces em contato com a prensa de ruptura, conforme preconizado pela NBR 5739:2003.

3.4.2.2 Absorção de água por sucção capilar

Segundo a norma NBR 9779:2012 a medida da absorção de água por absorção capilar é determinada a partir da diferença entre a massa do corpo de prova em estado seco e a massa que apresente a cada 3 h, 6 h, 48 h e 72 h após os corpos de prova entrarem em contato com a água. A superfície do concreto ensaiado deve ser seca com pano absorvente antes de cada pesagem.

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio após ter se cumprido os períodos de cura pré-definidos nos corpos de prova prismáticos (com o sensor) com o intuito de posteriormente correlacionar os valores de capilaridade nos corpos de prova cilíndricos (10 x 20) cm nessas mesmas idades de cura dos prismas do estudo de corrosão.

3.4.2.3 Potencial de corrosão

O potencial de corrosão é a diferença de potencial elétrico de um metal em relação a um eletrodo de referência, medido em condições de circuito aberto. Com o intuito de avaliar o comportamento dos sensores embebidos, as leituras de potencial de corrosão foram correlacionadas com as leituras de corrente galvânica e potencial do par.

O potencial de circuito aberto foi registrado duas vezes em cada ciclo de envelhecimento. Foi obtida uma leitura por cada ânodo totalizando 6 leituras por corpo de prova: quatro ânodos do sensor e as duas barras de reforço. A sequência básica adotada foi a seguinte:

- 1) Após o período de cura em câmara úmida ter terminado, os corpos foram secos em estufa a 50 °C durante 5 dias.
- 2) Na sequência começou a etapa de imersão parcial dos corpos de prova na solução de NaCl com duração de 2 dias;
- 3) No transcurso da etapa de imersão foi medido o potencial de corrosão em cada dia de imersão.

Nas leituras de diferença de potencial foi usado um eletrodo de referência de Cu/CuSO₄ da empresa ANALION. Segundo pesquisa bibliográfica, no caso de corrosão localizada, na medida que cresce o grau de contaminação por cloretos, mais negativo tende a ficar o valor de E_{corr} (JIN *et al.*, 2017).

Huafu *et al.* (2015) revelaram que os valores de potencial se tornaram mais negativos a medida que aumentou o teor de cloreto de sódio que não se dissipou e cristalizou em espaços tais como vazios e fissuras dentro do concreto. A maior parte das leituras se tornaram mais eletronegativas, após um ou dois ciclos.

3.4.2.4 Corrente galvânica e potencial do par

O ensaio demorou 42 minutos por corpo de prova, 7 minutos por ânodo considerando que é recomendável efetuar a leitura da corrente galvânica pouco tempo após o estabelecimento do contato elétrico entre o ânodo e o cátodo, já que essa corrente não é estável ao longo do tempo de medição (POLDER; PEELEN; LEEGWATER, 2008 *apud* ARAÚJO *et al.*, 2013). De forma paralela ao ensaio de corrente galvânica foi desenvolvido o ensaio de potencial do par.

3.4.2.5 Método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata (AgNO_3)

Este método colorimétrico é um teste qualitativo. A sua principal aplicação é a determinação da profundidade da frente de penetração de cloretos que ingressam no concreto pelos fenômenos da absorção associada a difusão. O método não quantifica os teores de cloretos livres (REAL *et al.*, 2015; FRANÇA, 2011).

O mesmo consiste em aspergir solução aquosa de AgNO_3 0,1 M às fatias fraturadas de concreto. Quando a solução de nitrato de prata é aspergida na superfície do concreto, ocorre uma reação fotoquímica. Onde há presença de cloretos livres ocorre a formação de um precipitado branco de cloreto de prata. Na região sem cloretos ou com cloretos combinados, há formação de um precipitado marrom, o óxido de prata (MEDEIROS, 2008; MARCONDES, 2012).

Porém, na presença de carbonatos também há formação de um precipitado branco. Sendo esse um dos motivos que dificulta a implementação desta técnica mais frequentemente nas inspeções de campo (JUCÁ, 2002). Por isso, os corpos de prova foram rompidos no sentido do fluxo de cloretos instantes antes do ensaio para evitar que ocorresse carbonatação ao ficarem expostos ao ambiente de laboratório. Foi feito também um teste com fenolftaleína de forma paralela para evitar falsos positivos, em uma das fatias dos corpos de prova.

Após a aspersão da solução aquosa de Nitrato de prata foram realizadas dez medidas, com 10 mm entre cada uma, seguindo as recomendações da NT BUILD 492 (2000). De modo a evitar erros grosseiros na leitura da profundidade alcançada pelos cloretos.

Algumas recomendações foram consideradas. Por exemplo, no caso de impossibilidade de leitura pela presença de agregados, deve-se alterar o ponto de medição ou ignorar esta profundidade se houver outras cinco válidas (REAL *et al.*, 2015; FRANÇA, 2011).

Além disto, para evitar o efeito parede, se deve evitar medidas de profundidade menores que 10 mm das bordas. Ou seja, não se deve realizar este ensaio na superfície externa dos corpos de prova, uma vez que estas regiões apresentam mais água o que pode ocasionar maior dissolução dos

cloretos neste local (FRANÇA, 2011). Antes de aspergir o nitrato de prata e a fenolftaleína, cada fatia foi escovada para eliminar o pó da superfície.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. PRIMEIRA ETAPA – TESTES EM SOLUÇÃO AQUOSA.

A primeira etapa do programa experimental compreendeu cinco conjuntos de leituras para cada um dos parâmetros considerados, a saber: - Potencial do par (E_{PAR}) e Corrente galvânica (I_{gal}). Cada conjunto de leituras incluiu três testes em média, com a exceção do quarto conjunto que só envolveu dois. A partir do terceiro conjunto, à solução de hidróxido de cálcio ($Ca(OH_2)$) foi adicionado cloreto de sódio ($NaCl$), com o intuito de simular um ambiente contaminado com íons cloretos. A Tabela 8 mostra o tempo em dias que os sensores estavam na solução aquosa no momento que foram desenvolvidos os testes. Nessa tabela, o primeiro conjunto é representado pelas siglas (1º), o segundo pelas siglas (2º) e assim em diante até o quinto; foram denominados dessa forma (conjuntos) porque compreendem no máximo três testes ou leituras (I, II e III) realizadas em datas diferentes e geralmente sucessivas. Vale destacar que o Sensor A e Sensor B usados nesta etapa são idênticos, configurando um estudo com duas repetições.

Tabela 8: Esquematização da primeira etapa.

SENSOR A				SENSOR B			
		E_{PAR}	I_{gal}			E_{PAR}	I_{gal}
1º	I	2 d	8 d	1º	I	7 d	0 d
	II	3 d	9 d		II	8 d	1 d
	III	6 d	10 d		III	9 d	13 d
2º	I	51 d	51 d	2º	I	48 d	48 d
	II	52 d	52 d		II	49 d	49 d
	III	53 d	53 d		III	50 d	50 d
3º	REF	TEVE	NÃO	3º	REF	TEVE	NÃO
	I	64 d	64 d		I	61 d	61 d
	II	65 d	65 d		II	62 d	62 d
	III	66 d	66 d		III	63 d	63 d
4º	I	99 d	99 d	4º	I	96 d	96 d
	II	106 d	106 d		II	103 d	103 d
5º	I	125 d	125 d	5º	I	122 d	122 d
	II	126 d	126 d		II	123 d	123 d
	III	127 d	127 d		III	124 d	124 d

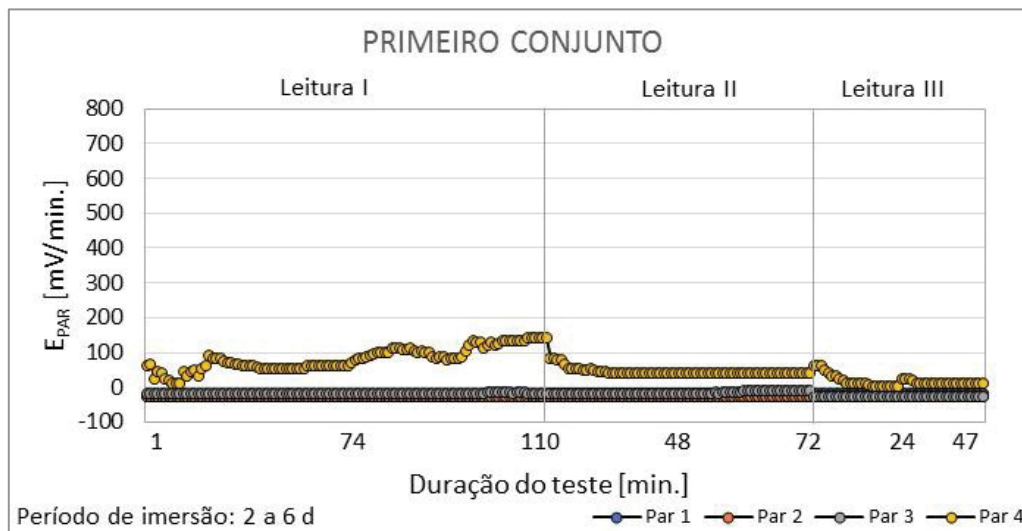
Fonte: Autor (2018)

4.1.1 Teste do potencial do par (E_{par})

4.1.1.1 Sensor A

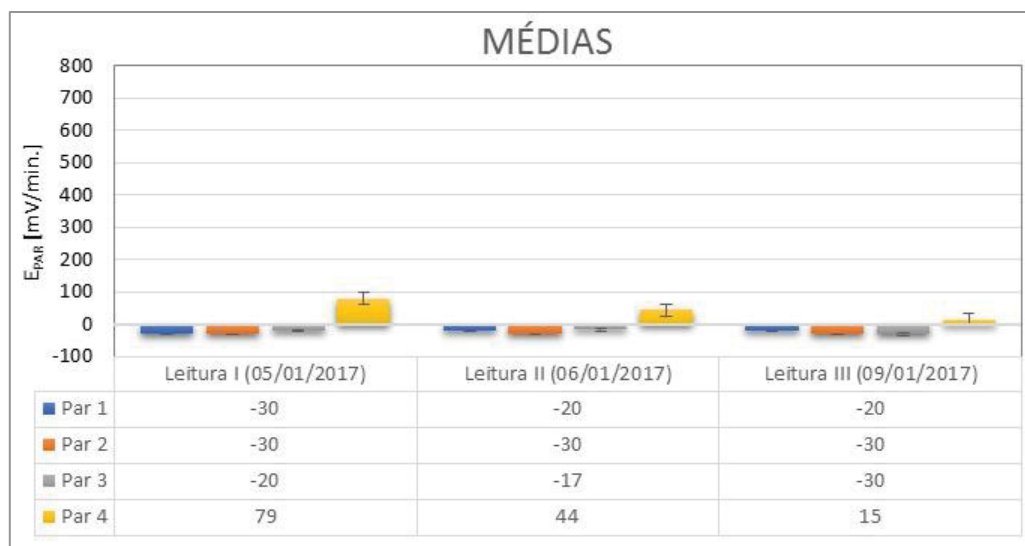
Nas figuras o primeiro par ânodo 1- cátodo está representado como Par 1, o segundo como Par 2 e assim sucessivamente até o quarto par do sensor (Par 4), conforme mostra a Figura 10. As Figuras 13 e 14 mostram os resultados obtidos no teste de potencial do par para o Sensor A no primeiro conjunto.

Figura 13: Primeiro conjunto de leituras do E_{par} . Sensor A sem Cl⁻.



Fonte: Autor (2018)

Figura 14: Médias do primeiro conjunto de leituras do E_{par} . Sensor A sem Cl⁻.



Fonte: Autor (2018)

A diferença de potencial dos pares 1, 2 e 3 permaneceu no intervalo de -20 a -30 mV/min, ver Figura 14. Contrariamente, o valor de potencial do Par 4 se mostrou instável nesse primeiro conjunto com tendência a diminuir, mas na faixa

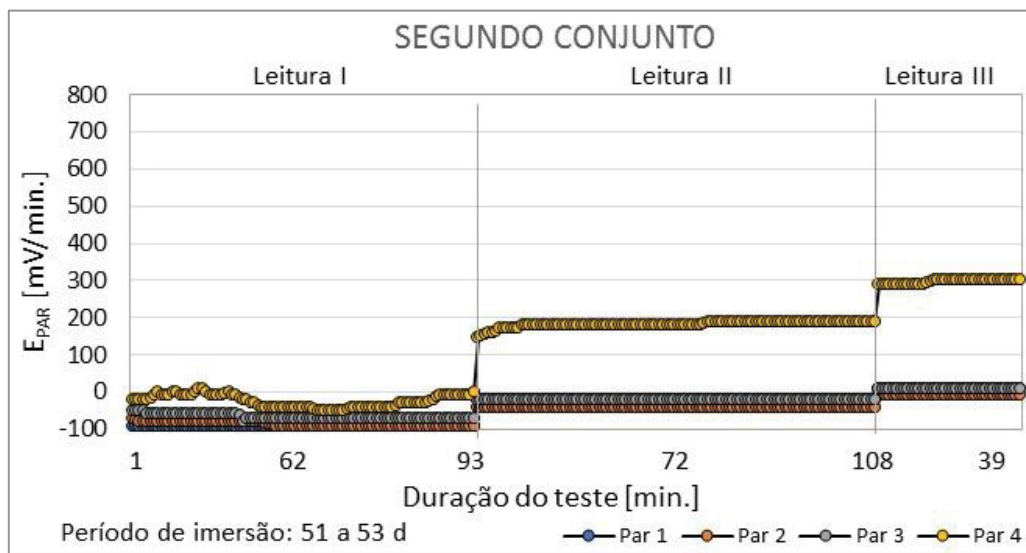
dos valores positivos. Durante a leitura 2 estabilizou-se em 40 mV/min até o final do intervalo, apresentando menor variação do que na primeira leitura; durante a leitura três, da mesma forma que na segunda, variou no começo do experimento, mas termina por se estabilizar em 10 mV/min como pode ser observado na Figura 14.

Os valores representados nos gráficos são resultado da combinação dos potenciais do cobre e do aço carbono (E_{par}). A análise de variância mostrou que existe variação significativa nas leituras entre os quatro pares do sensor e somente o Par 2 manteve desvio padrão igual a zero nas três leituras.

A partir dos valores obtidos nos pares, é possível determinar um valor médio geral para o sensor como um todo em cada leitura. Teoricamente, essa diferença de potencial média pode ser considerada como o potencial de referência do sensor galvânico. O sensor deve ser capaz de manter ou voltar a esse valor médio no transcurso do tempo, de forma tal que possa ser usada como um potencial de referência confiável, se as condições do meio no qual está o sensor não mudam (PAWLICK *et al.*, 1998).

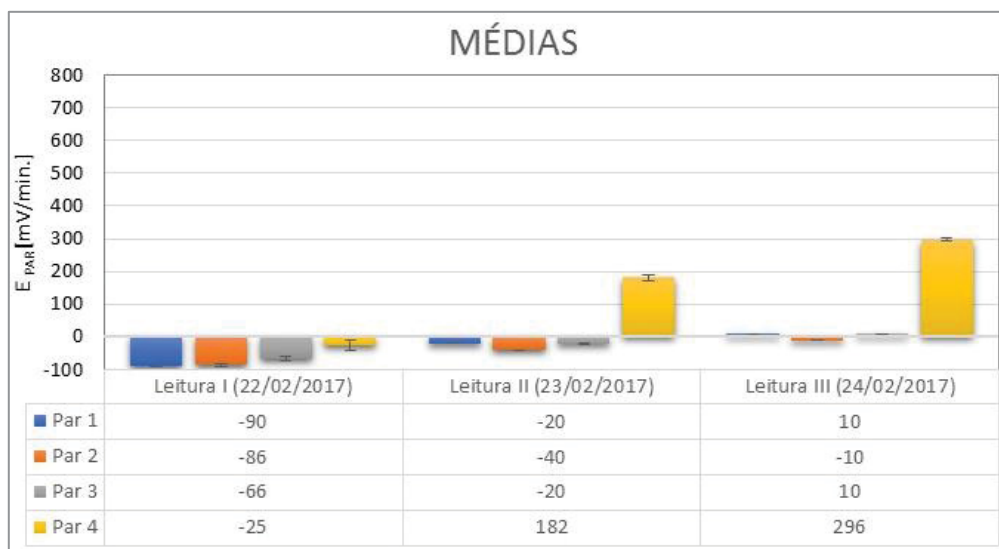
Porém, já que as leituras individuais dos pares apresentaram variação significativa entre as leituras optou-se por não determinar um valor de potencial para o sensor senão considerar cada par de forma individual. As Figuras 15 e 16 mostram os resultados obtidos no teste de potencial do par para o Sensor A no segundo conjunto.

Figura 15: Segundo conjunto de leituras do E_{par} . Sensor A sem Cl.



Fonte: Autor (2018)

Figura 16: Médias do segundo conjunto de leituras do E_{par} . Sensor A sem Cl^-



Fonte: Autor (2018)

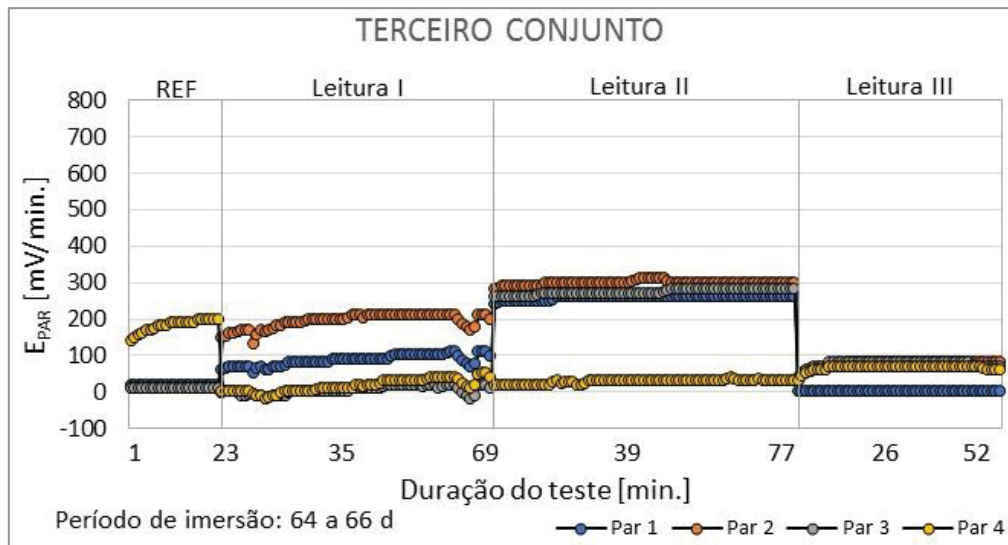
A diferença de potencial dos pares 1 e 3 mudou de valores negativos para valores positivos o que não aconteceu durante o primeiro conjunto. O potencial do Par 2 se manteve negativo, como mostra a Figura 16.

O potencial do Par 4 variou de -25 a 296 mV/min em média. O desvio padrão deste par mudou de 34 na Leitura 1 do primeiro conjunto para 5 na Leitura III desse segundo conjunto. O comportamento desse par foi diferenciado com relação aos outros três. Os potenciais dos pares não ficaram estáveis no transcurso dos primeiros dois conjuntos, sendo considerados estatisticamente diferentes que variaram de uma leitura para outra.

Como foi apresentado, durante os dois primeiros conjuntos de leitura o potencial do sensor, em média, foi negativo (reação eletrolítica). A exceção foi o Par 4, que apresentou potencial do par positivo desde o início das medições. O terceiro conjunto de leituras foi realizado depois da adição de 3,5% de NaCl na solução aquosa saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, com o objetivo de testar se o sensor teria seus valores de potencial do par influenciado pela mudança de meio.

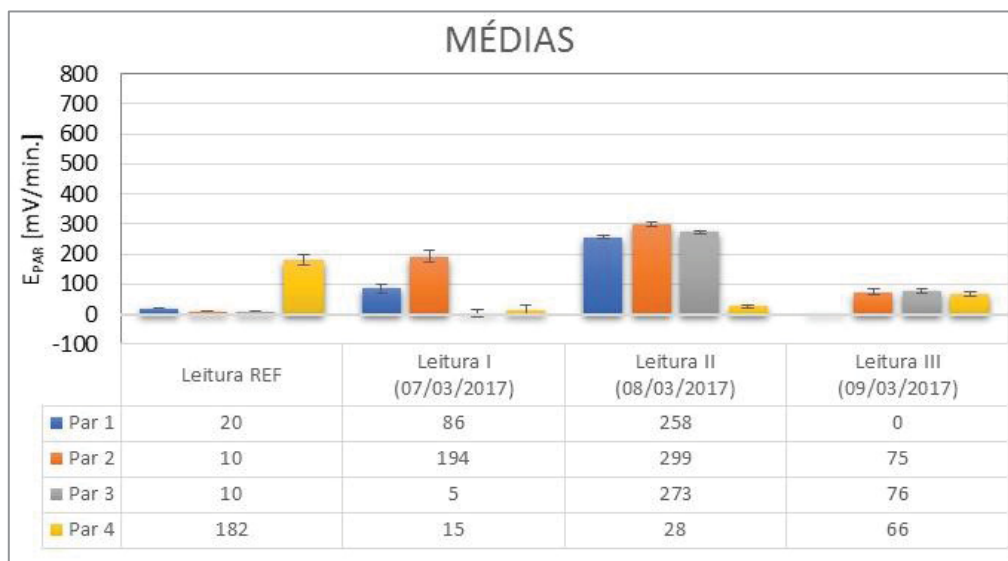
Neste contexto, na Figura 17 está mostrado como se comportou o potencial dos pares logo após a contaminação da solução saturada de hidróxido de cálcio com cloreto de sódio (teor 3,5% em massa). Este terceiro conjunto é composto por quatro leituras. A leitura de referência (Leitura REF) foi feita 20 minutos antes de adicionar o NaCl com o objetivo de avaliar se a presença de um agente agressivo provoca uma mudança imediata no potencial dos pares, o que de fato aconteceu e foi refletido na Leitura 1. Note-se que a maioria dos valores de potencial dos pares são positivos (reação galvânica) neste terceiro conjunto, de modo que atingiram os valores mais altos durante a Leitura 2, como pode ser verificado na Figura 18.

Figura 17: Terceiro conjunto de leituras do Epar. Sensor A com Cl-.



Fonte: Autor (2018)

Figura 18: Médias do terceiro conjunto de leituras do E_{par} . Sensor A com Cl-.

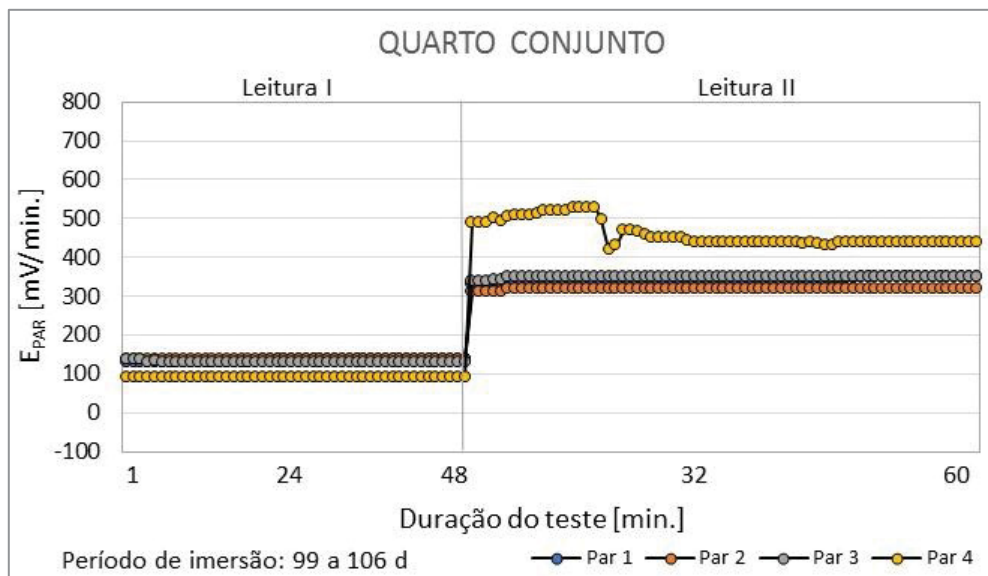


Fonte: Autor (2018)

A seguir o quarto e quinto conjunto mostram a evolução do potencial do par (E_{par}) ao longo do tempo após a adição de NaCl à solução de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH}_2)$). O objetivo desta parte do monitoramento foi entender como os valores de E_{par} evoluem ao longo de tempo de exposição na condição de exposição ao ataque de cloretos.

A Figura 19 mostra que os valores de potencial dos pares aumentaram consideravelmente nesse quarto conjunto e mostraram maior estabilidade durante as leituras. Os maiores valores foram registrados durante a Leitura II como pode ser constatado na Figura 20.

Figura 19: Quarto conjunto de leituras do E_{par} . Sensor A com Cl⁻.



Fonte: Autor (2018)

Figura 20: Médias do quarto conjunto de leituras do E_{par} . Sensor A com Cl⁻.



Fonte: Autor (2018)

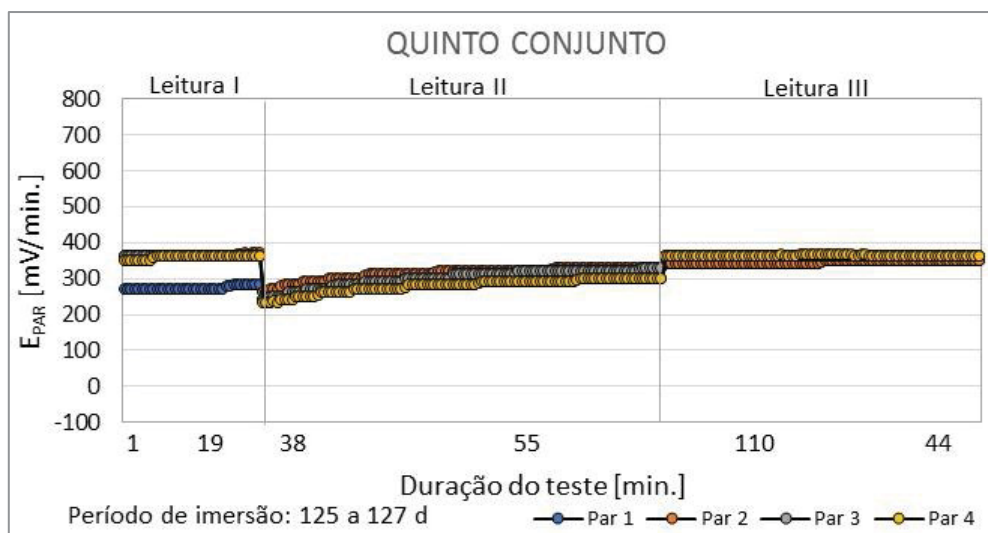
Como mostram as Figuras 21 e 22, durante o quinto conjunto os potenciais continuaram positivos e com tendência a se estabilizar. Após a contaminação com cloretos da solução aquosa os valores de potencial dos pares do Sensor A se tornaram característicos de uma reação galvânica, com os valores de E_{par} se tornando positivos.

Esse acréscimo nos valores de E_{par} se tornando positivos significa que a macro-célula galvânica é mais reativa de forma tal que o processo de corrosão

é espontâneo na presença de íons agressivos permitindo identifica-los rapidamente, como confirma a Figura 22.

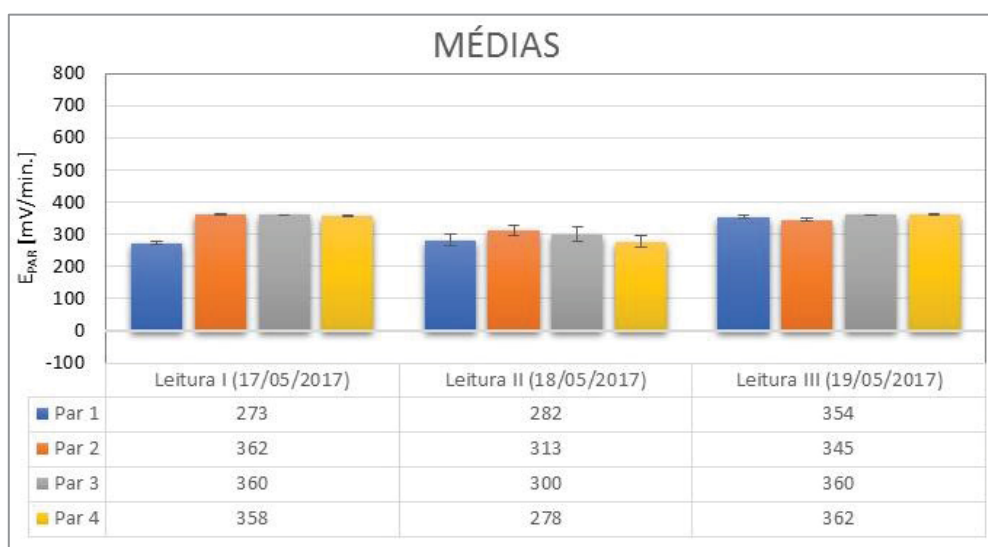
Cabe destacar que o pH da solução onde ficou imerso o Sensor A ficou no intervalo de 12 a 13 durante todo o tempo de imersão na solução aquosa saturada com Ca(OH)_2 , conforme mostrado na Figura 23.

Figura 21: Quinto conjunto de leituras do E_{par} . Sensor A com Cl^- .



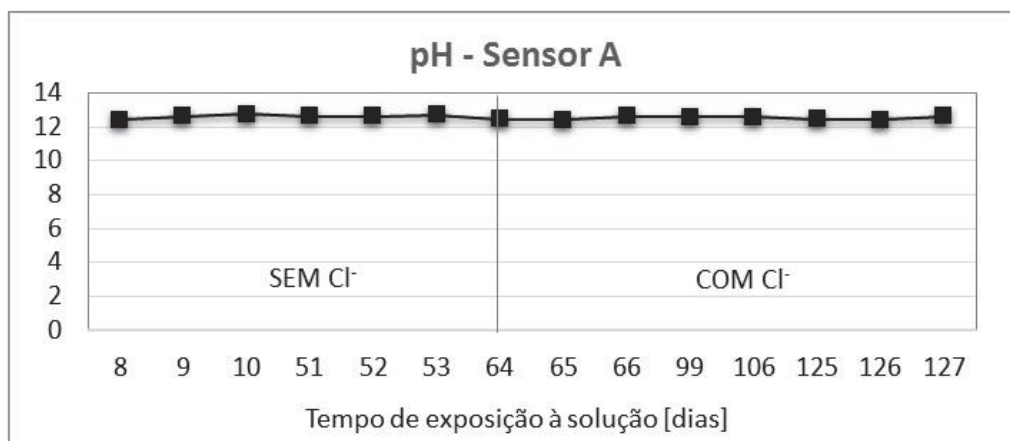
Fonte: Autor (2018)

Figura 22: Médias do quinto conjunto de leituras do E_{par} . Sensor A com Cl^- .



Fonte: Autor (2018)

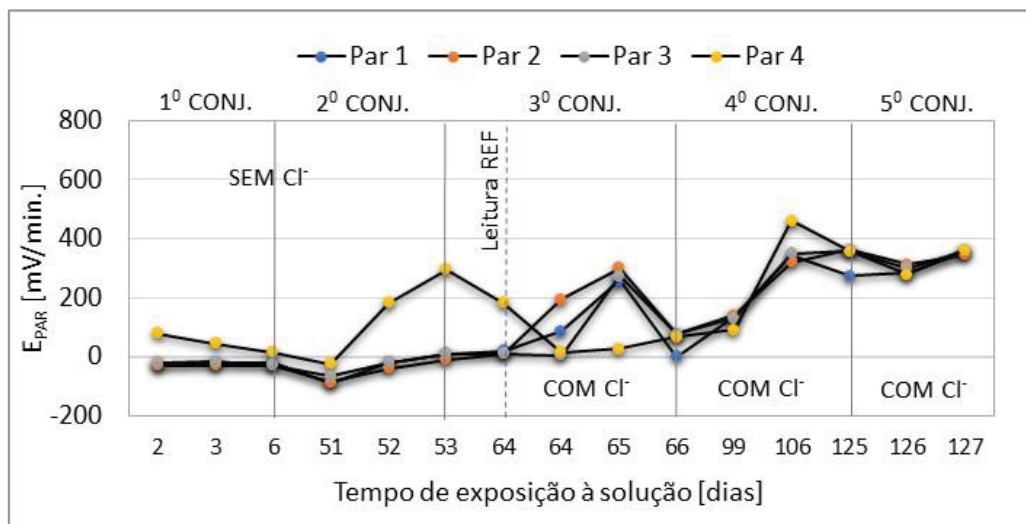
Figura 23: Valor do pH da solução aquosa de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ao longo do tempo.



Fonte: Autor (2018)

A Figura 24 resume o comportamento do potencial dos pares do Sensor A ao longo do tempo. O gráfico está composto pelos valores médios obtidos em cada leitura com o intuito de mostrar um cenário global do Sensor A nesta etapa. Após a contaminação com cloretos os valores de potencial galvânico se tornaram positivos e passaram a aumentar. Sendo assim, pode-se afirmar que a experiência com o Sensor A de tentar detectar a corrosão por cloretos foi positiva, sendo um indicativo da viabilidade de emprego do sensor de corrosão para estruturas de concreto armado.

Figura 24: Comportamento do potencial dos pares do Sensor A ao longo do tempo.



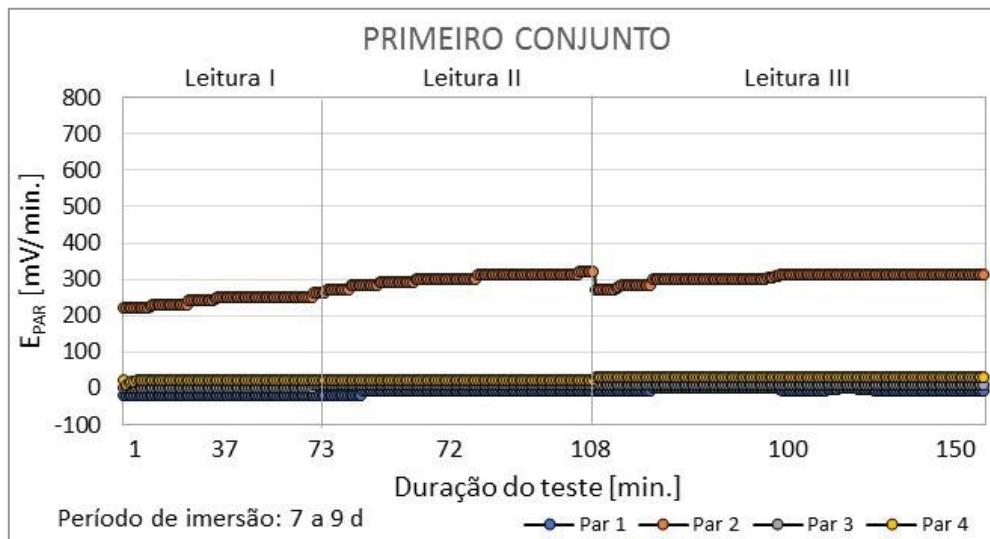
Fonte: Autor (2018)

4.1.1.2 Sensor B

O Sensor B estava com 6 dias na solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ quando foi feita a Leitura I do primeiro conjunto (Ver Tabela 12), no entanto observou-se grande variação nas leituras comparando um par com relação a outro. As Figuras 25 e

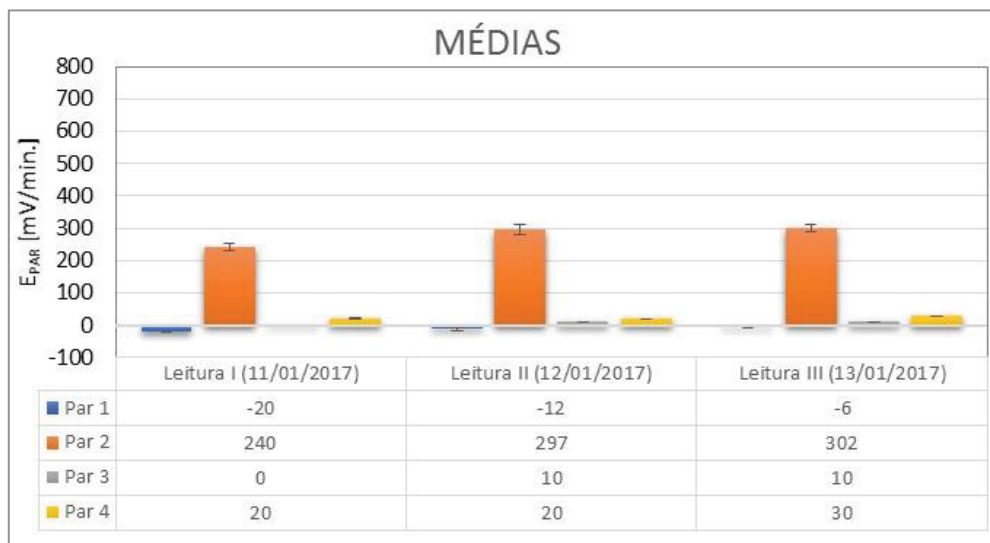
26 mostram os resultados do primeiro conjunto de leituras com o sensor imerso em solução saturada de Ca(OH)_2 .

Figura 25: Primeiro conjunto de leituras do E_{par} . Sensor B sem Cl^- .



Fonte: Autor (2018)

Figura 26: Médias do primeiro conjunto de leituras do E_{par} . Sensor B sem Cl^- .



Fonte: Autor (2018)

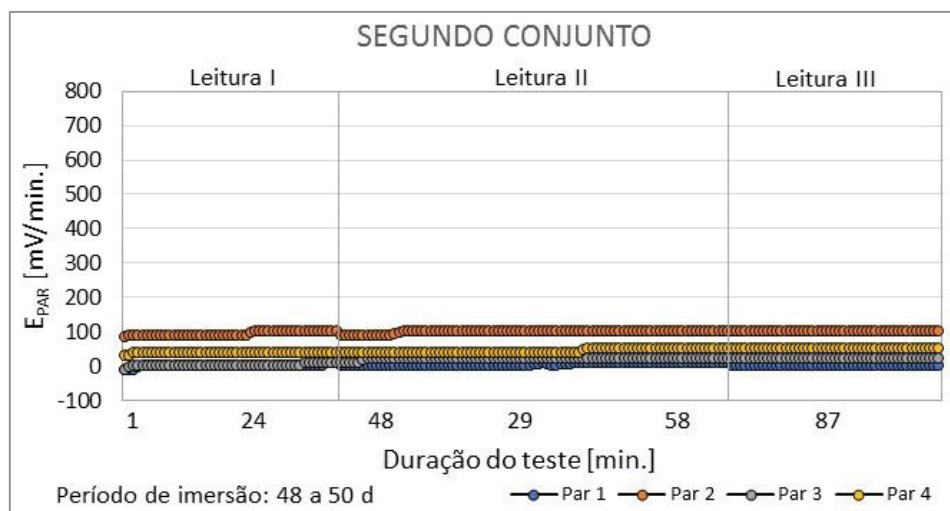
Na Figura 26 observa-se que o Par 1 é o único cuja diferença de potencial foi negativa nas três leituras desse primeiro conjunto. O Par 2 manteve o maior potencial comparando os quatro pares, apresentando valores acima de 250

mV/min. Os pares 3 e 4 apresentaram maior estabilidade que os primeiros variando de 10 a 35 mV/min.

Dado que a diferença de potencial dos pares 2, 3 e 4 é positiva, na presença de íons cloretos a reação entre o cobre e o aço carbono deverá ser espontânea (célula galvânica).

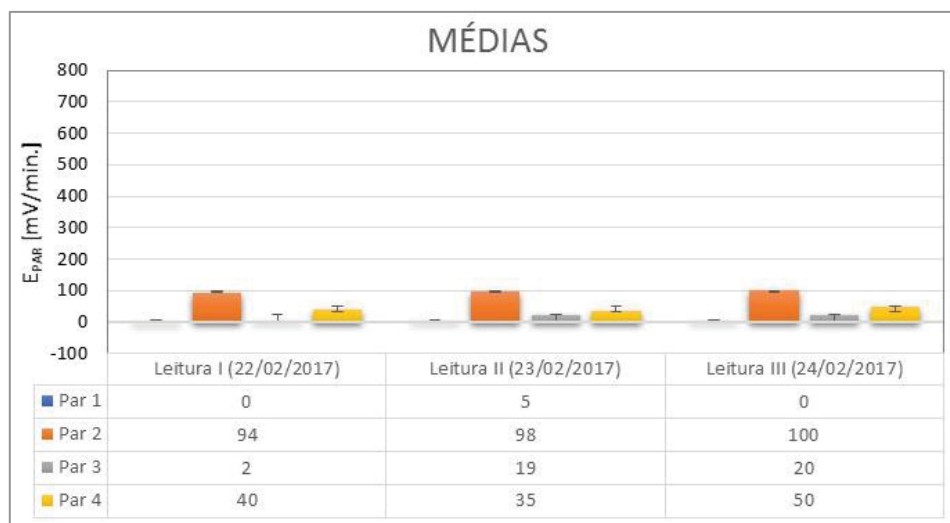
As Figuras 27 e 28 mostram os resultados obtidos no segundo conjunto de leituras de potencial do par com o Sensor B. A diferença de potencial dos pares 2, 3 e 4 continuou positiva. O potencial do Par 1 virou positivo após a Leitura I. Neste caso, os pares apresentaram maior estabilidade durante as três leituras.

Figura 27: Segundo conjunto de leituras do E_{par} . Sensor B sem Cl^- .



Fonte: Autor (2018)

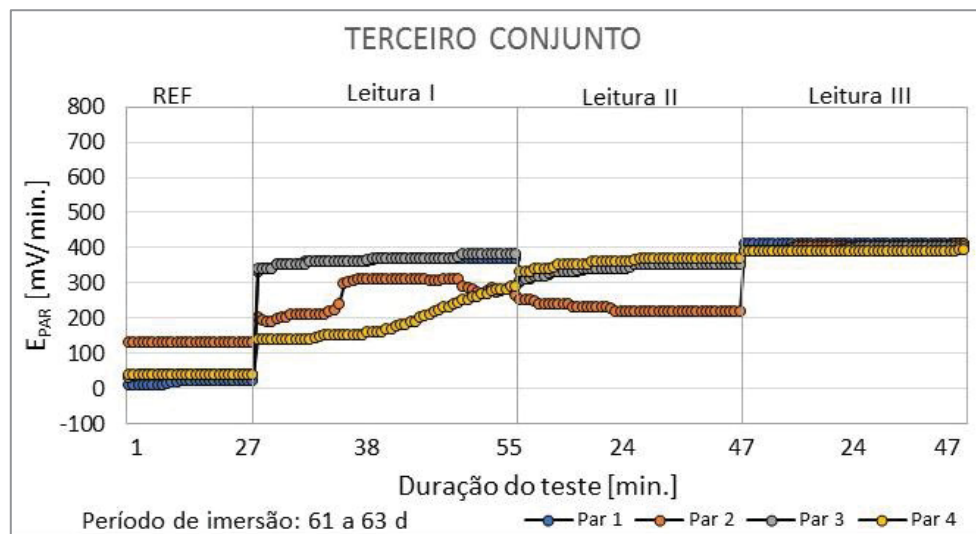
Figura 28: Médias do segundo conjunto de leituras do E_{par} . Sensor B sem Cl^- .



Fonte: Autor (2018)

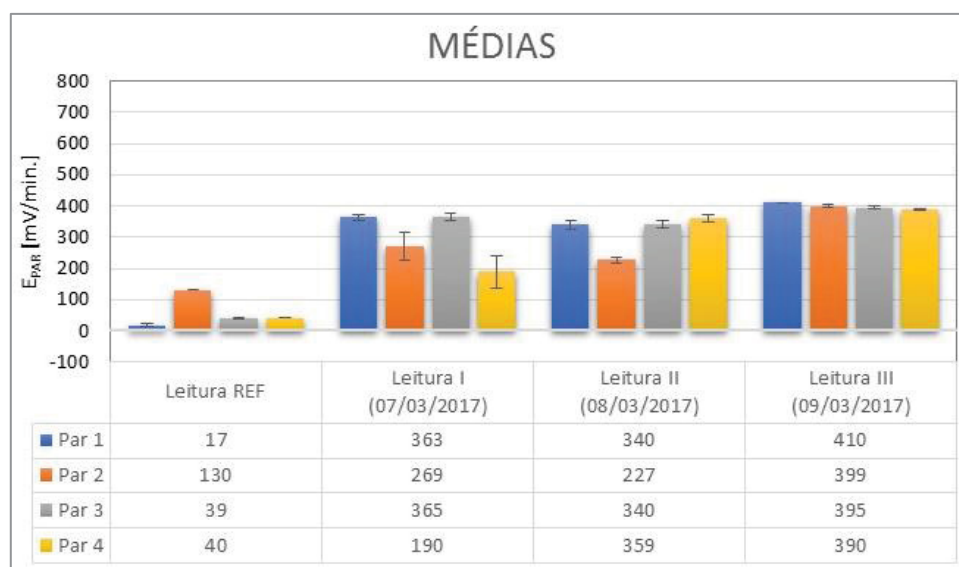
As Figuras 29 e 30 apresentam os dados do terceiro conjunto de leituras, que se refere ao momento em que foi adicionado 3,5% de NaCl na solução aquosa saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Durante a leitura de referência (Leitura REF), a variação nas leituras de cada par foi pequena, contudo, alguns minutos após a contaminação, os potenciais se comportaram de forma instável (Leitura I). Como esperado e de forma coerente com o que foi verificado no Sensor A, a adição de NaCl provocou uma mudança no potencial dos pares, aumentando drasticamente os valores de potencial dos pares. Os maiores valores foram registrados na Leitura III durante a qual os potenciais se mostram mais estáveis ao longo do teste.

Figura 29: Terceiro conjunto de leituras do E_{par} . Sensor B com Cl^- .



Fonte: Autor (2018)

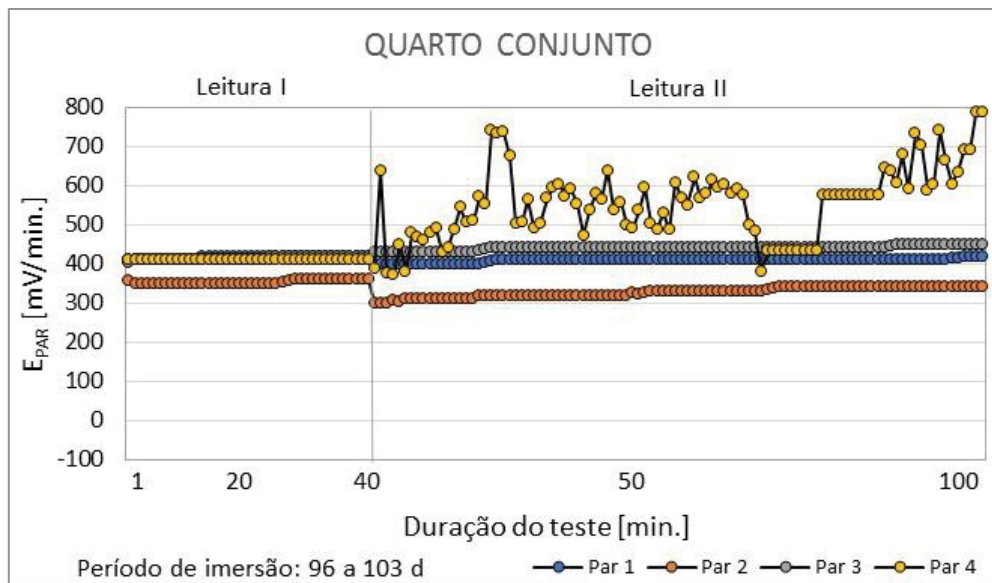
Figura 30: Médias do terceiro conjunto de leituras do E_{par} . Sensor B com Cl^- .



Fonte: Autor (2018)

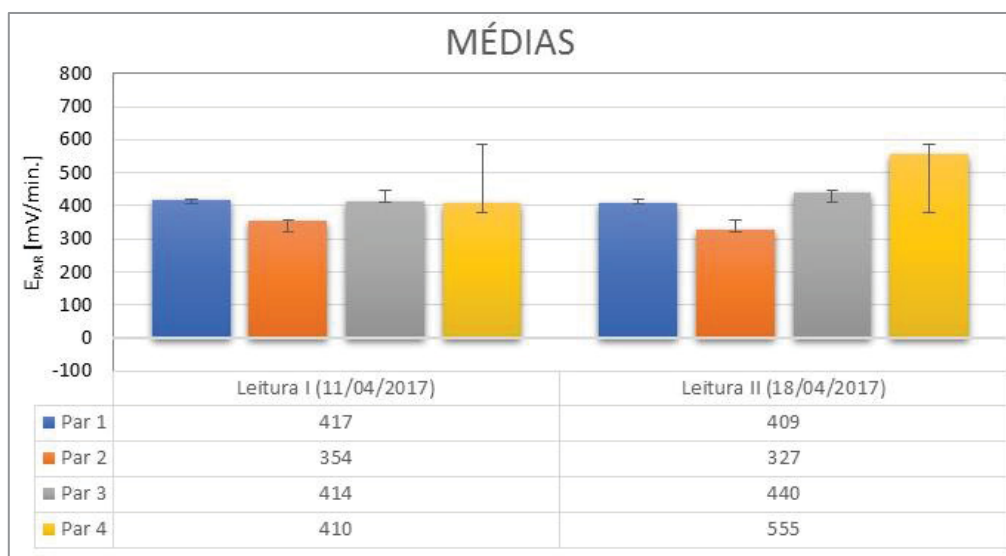
Foi constatado que a partir do terceiro conjunto os potenciais dos pares de ambos sensores mantiveram uma tendência a aumentar e na faixa dos valores positivos o que é favorável se o intuito é usar o sensor para monitorar o ingresso de íons agressivos nas estruturas de concreto como já foi comentado anteriormente. As Figuras 31 e 32 mostram os dados obtidos no quarto conjunto de leituras de E_{par} .

Figura 31: Quarto conjunto de leituras do E_{par} . Sensor B com Cl⁻.



Fonte: Autor (2018)

Figura 32: Médias do quarto conjunto de leituras do E_{par} . Sensor B com Cl⁻.

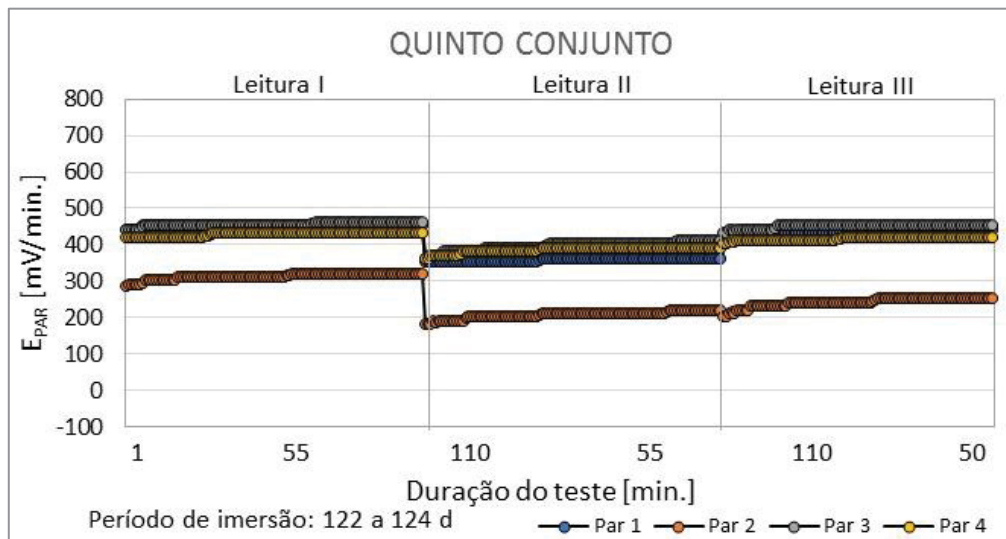


Fonte: Autor (2018)

Com exceção do Par 4 na Leitura II, os demais pares do sensor se comportaram de forma estável em cada leitura, semelhante ao comportamento do Sensor A no seu quarto conjunto (Ver Figura 19 e 20).

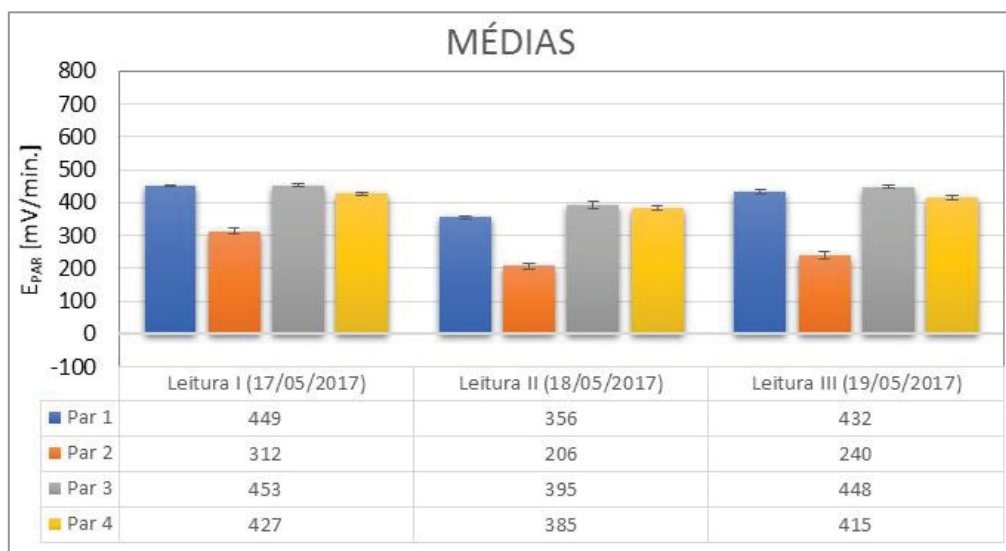
As Figuras 33 e 34 mostram os dados de E_{PAR} obtidos durante o quinto conjunto de leituras. Note-se que a partir da contaminação das soluções onde os sensores ficaram imersos durante o experimento, no tempo equivalente ao quinto conjunto de leituras, os valores de diferença de potencial ficaram acima dos 200 mV/min, tanto para o sensor A como para o sensor B.

Figura 33: Quinto conjunto de leituras do E_{par} . Sensor B com Cl⁻.



Fonte: Autor (2018)

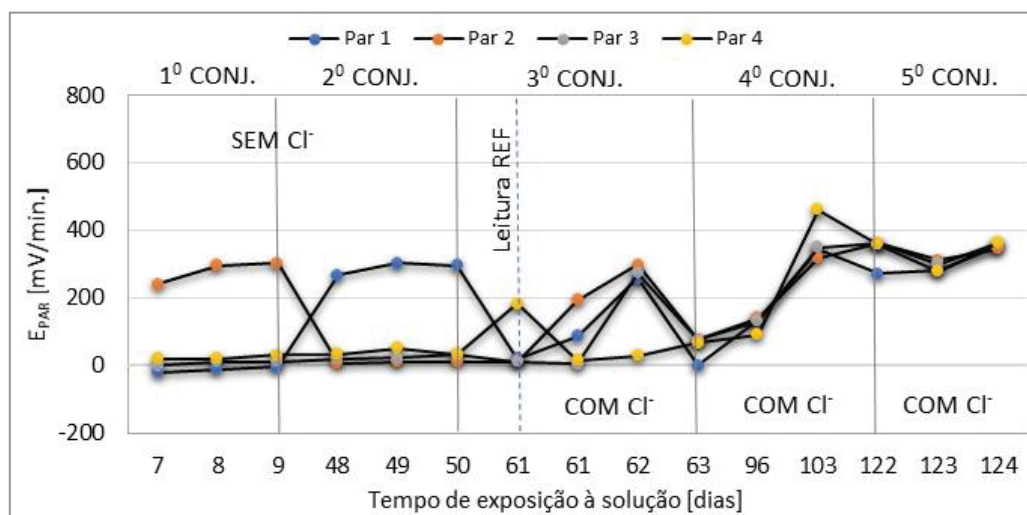
Figura 34: Médias do quinto conjunto de leituras do E_{par} . Sensor B com Cl⁻.



Fonte: Autor (2018)

A Figura 35 resume o comportamento do potencial dos pares do Sensor B ao longo do tempo. O gráfico está composto pelos valores médios obtidos em cada leitura com o intuito de mostrar um cenário global do Sensor B nesta etapa. De forma semelhante ao observado no Sensor A os valores passam a aumentar na faixa dos valores positivos uma vez que o sistema foi contaminado com NaCl.

Figura 35: Comportamento do potencial dos pares do Sensor B ao longo do tempo.



Fonte: Autor (2018)

4.1.2 Teste de corrente galvânica (I_{gal})

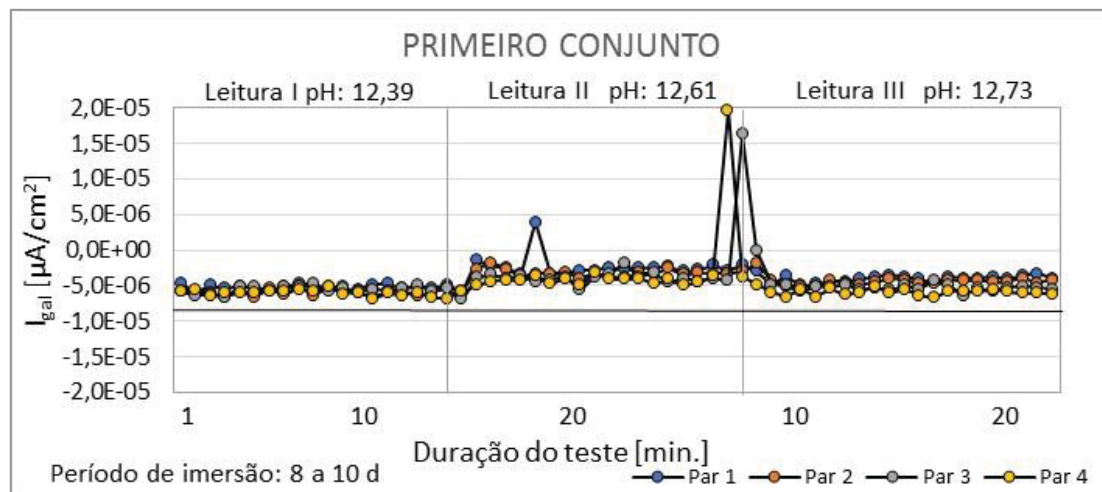
4.1.2.1 Sensor A

A diferença entre o potencial positivo correspondente ao cátodo e o potencial negativo correspondente ao ânodo gera uma corrente elétrica entre os eletrodos da ordem de micros amperes. Quando o teor de íons cloreto atinge um nível crítico ou a frente de carbonatação alcança as barras do ânodo do sensor, a passagem de corrente elétrica entre os eletrodos aumenta (ANDRADE *et al.*, 2008). Com o intuito de avaliar o desempenho do sensor desta pesquisa na medição da corrente galvânica em ambas as condições (solução aquosa saturada com $\text{Ca}(\text{OH})_2$ com e sem contaminação com cloretos) foram realizados cinco conjuntos de leituras como mostrado na Tabela 12.

O monitoramento da I_{gal} durante o primeiro conjunto de leituras está apresentado nas Figuras 37 e 38, indicando valores negativos e próximos a zero. De fato, os valores de corrente galvânica (I_{gal}) ficaram negativos e da ordem de micro-amperes durante as três leituras do primeiro e segundo conjunto. O comportamento desse parâmetro foi uniforme nos quatro pares do sensor em ambos conjuntos em concordância com os potenciais dos pares, típicos de uma reação eletrolítica, isto é, polarização catódica.

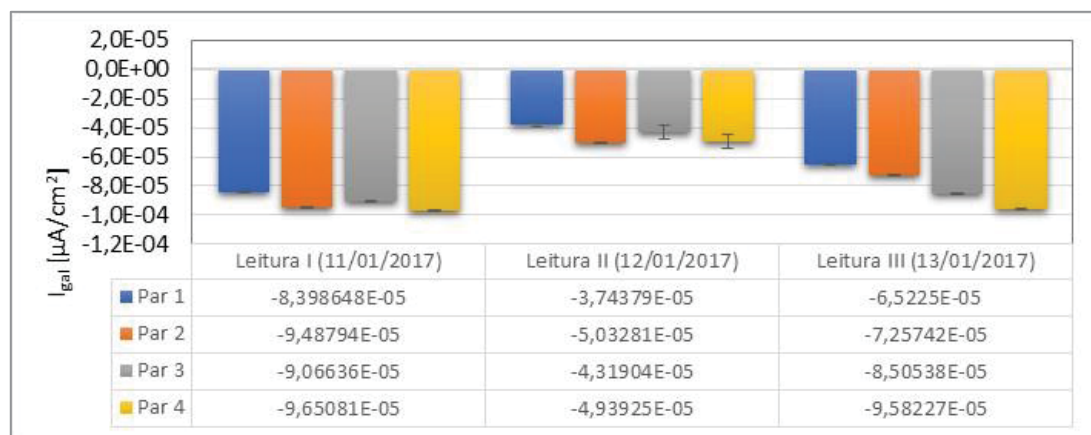
Nesta condição o processo de redução predomina sobre o processo de oxidação e o eletrodo que deveria se comportar como ânodo no sensor passa a sofrer apenas redução. Nesse contexto, a corrente galvânica que circula é negativa (SOUSA, 2014).

Figura 36: Primeiro conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor A sem Cl^- .



Fonte: Autor (2018)

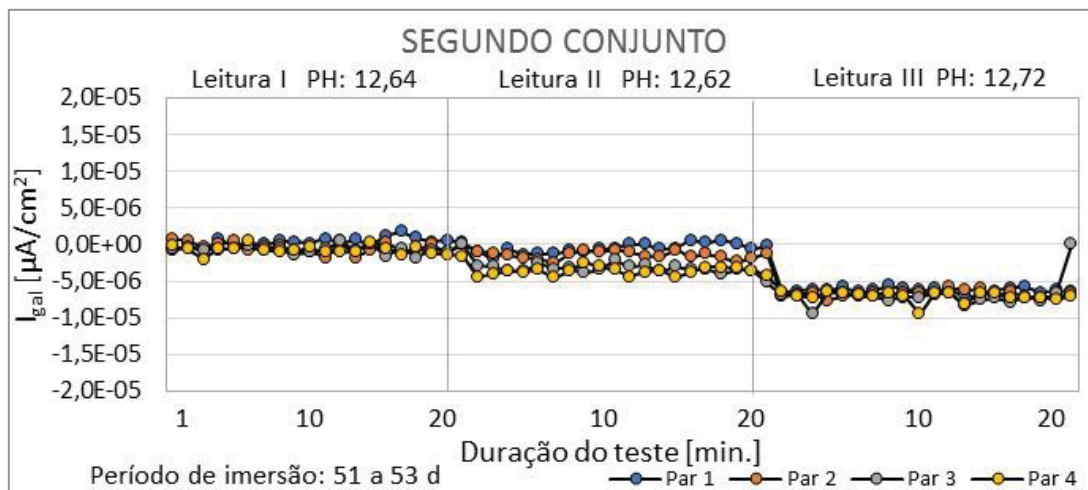
Figura 37: Médias do primeiro conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor A sem Cl^- .



Fonte: Autor (2018)

O monitoramento da I_{gal} durante o segundo conjunto de leituras está apresentado nas Figuras 38 e 39. Deve-se destacar que durante o segundo conjunto as leituras começam a aumentar já que se tornam menos negativas. Os menores valores foram registrados durante a última leitura desse segundo conjunto, ver Figura 39. A Leitura III foi desenvolvida após 52 dias de ter submergido o sensor na solução saturada de hidróxido de cálcio, nesse momento o pH da solução era 12,73, conforme mostrado na Figura 21. Sendo assim, o fator que deve ter influenciado esse comportamento das leituras é o tempo imerso na solução.

Figura 38: Segundo conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor A sem Cl^- .



Fonte: Autor (2018)

Figura 39: Médias do segundo conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor A sem Cl^-

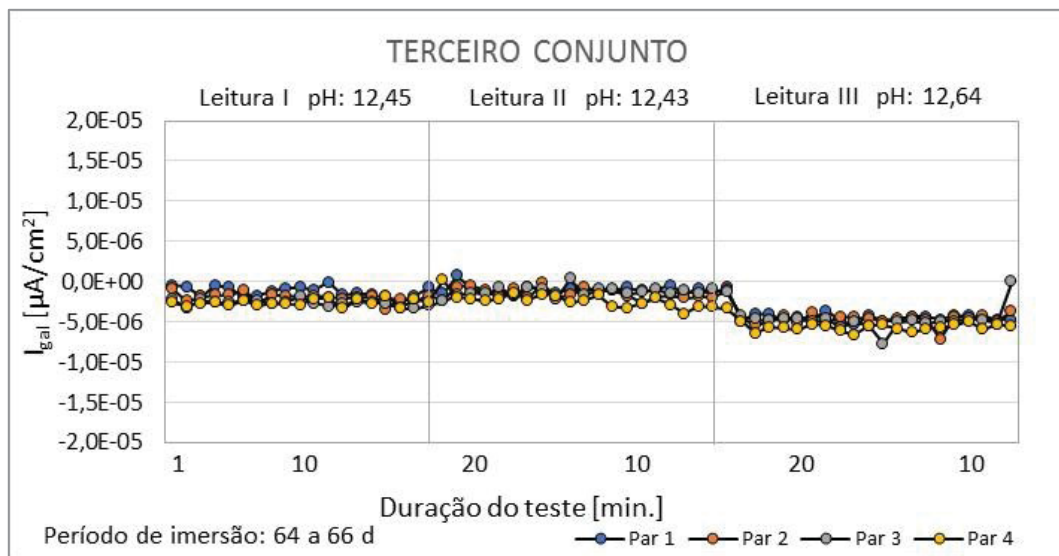


Fonte: Autor (2018)

As Figuras 40 e 41 mostram o comportamento do Sensor A na solução saturada de hidróxido de cálcio contaminada com 3,5% em massa de NaCl. Este terceiro conjunto de leituras começou quando o sensor tinha 64 dias na solução (Ver Tabela 10). Antes de cada leitura foi registrada a massa do sensor com o intuito de controlar a perda de massa dos ânodos, estes valores são mostrados na Figura 41 junto com os valores médios de I_{gal} para o terceiro conjunto de leituras.

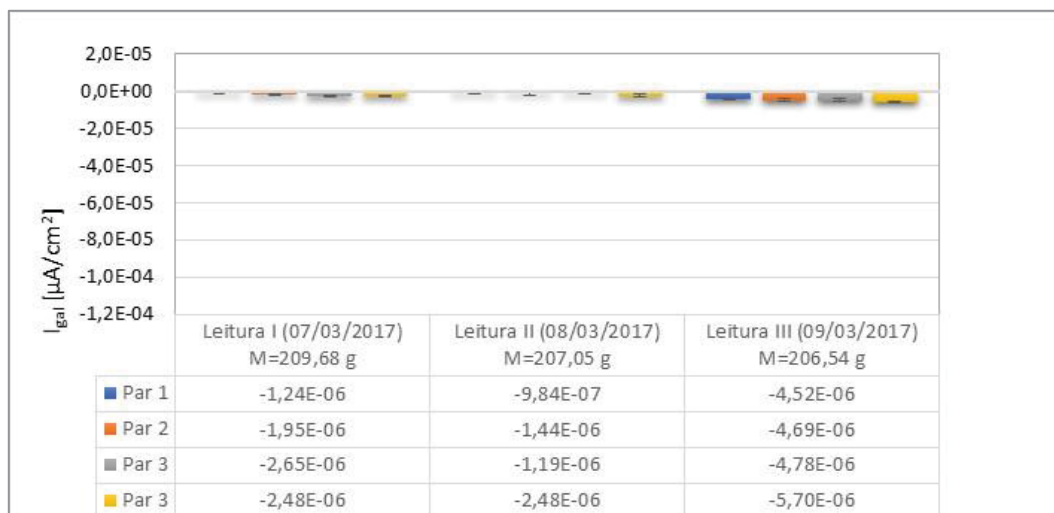
Os valores de massa indicam que os ânodos perderam massa durante as leituras II e III, porém, os dados de corrente não variaram muito com relação às leituras do segundo conjunto (Ver Figura 38 e 39) continuaram negativos e muito próximos de zero mesmo com a introdução da contaminação por íons cloretos. Durante a Leitura II a perda de massa no sensor foi de 1,25% e na Leitura III foi 1,50%.

Figura 40: Terceiro conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor A com Cl^- .



Fonte: Autor (2018)

Figura 41: Médias do terceiro conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor A com Cl^- .



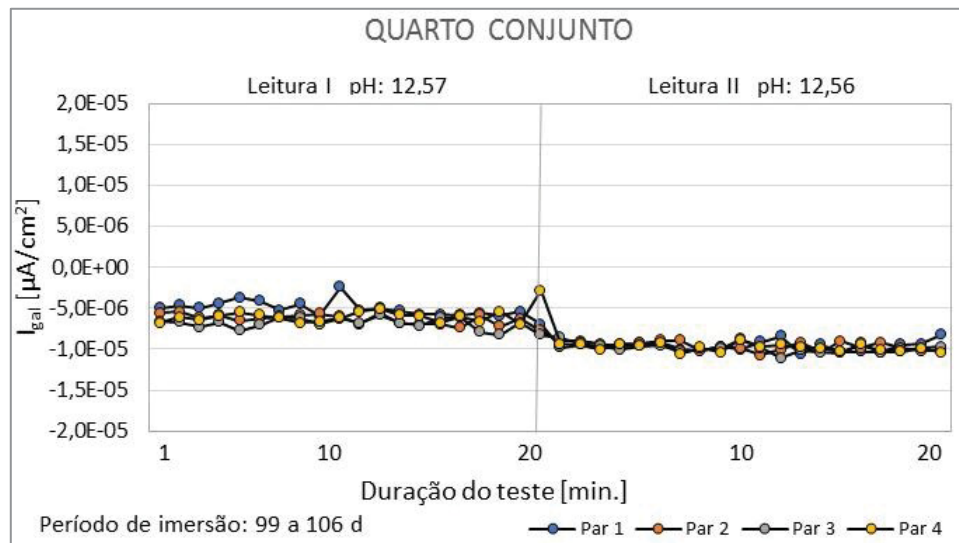
Fonte: Autor (2018)

Valores negativos de corrente galvânica indicam que o metal ativo está atuando como um cátodo, enquanto o metal mais nobre está agindo como ânodo devido ao estado passivo do metal que deveria estar sofrendo oxidação; condição na qual o potencial do metal ativo é superior ao do metal mais nobre (PARK *et al.*, 2005). Nessas condições, a intensidade da polarização anódica no par é baixa, de modo que a corrente galvânica permanece pequena.

Este comportamento é indicativo da condição ainda passiva do aço. Provavelmente, resultado do valor de pH do eletrólito onde esteve submerso o Sensor A durante o experimento. Note-se que ainda durante o quarto conjunto o pH da solução de hidróxido de cálcio contaminada com 3,5% em massa de cloreto de sódio está acima de 12, como evidenciado na Figura 21. As Figura 42

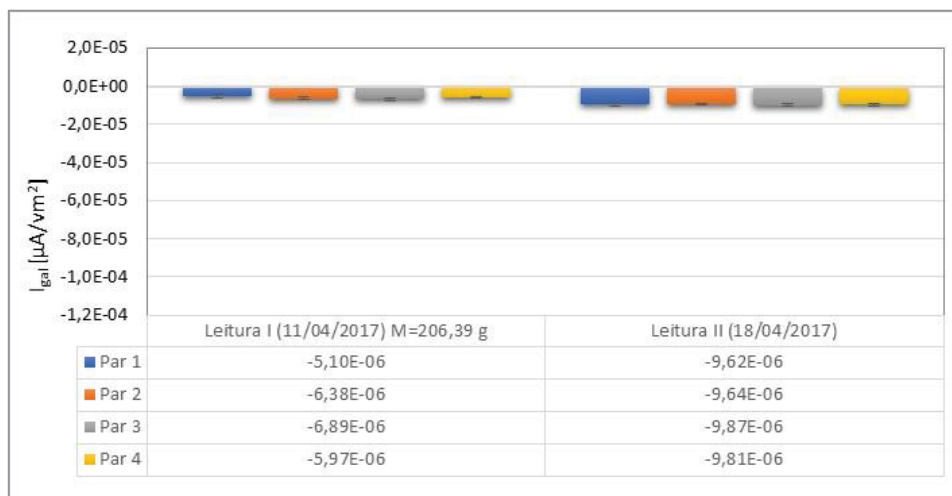
e 43 mostram as leituras de corrente galvânica durante o quarto conjunto de leituras.

Figura 42: Quarto conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor A com Cl^- .



Fonte: Autor (2018)

Figura 43: Médias do quarto conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor A com Cl^- .



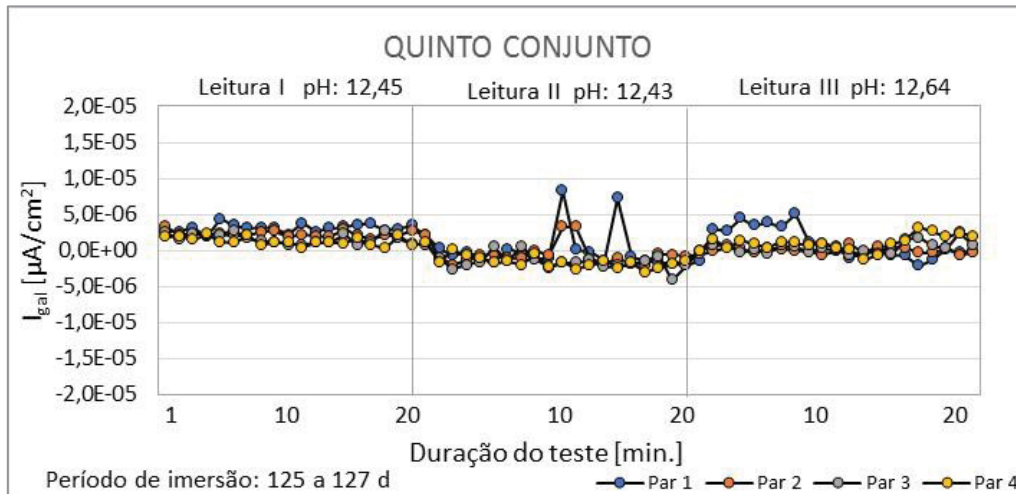
Fonte: Autor (2018)

As Figuras 44 e 45 mostram os valores de corrente galvânica para o quinto conjunto de leituras. Deve-se notar que os valores de corrente galvânica (I_{gal}) se mostram positivos no transcurso da Leitura I e III, na Leitura II somente o valor de I_{gal} do Par 2 é positivo.

De modo geral, isso significa que as leituras de I_{gal} começam a identificar a atividade de corrosão no sensor, que iniciou no ato de introdução da contaminação do NaCl na solução em que o sensor está imerso.

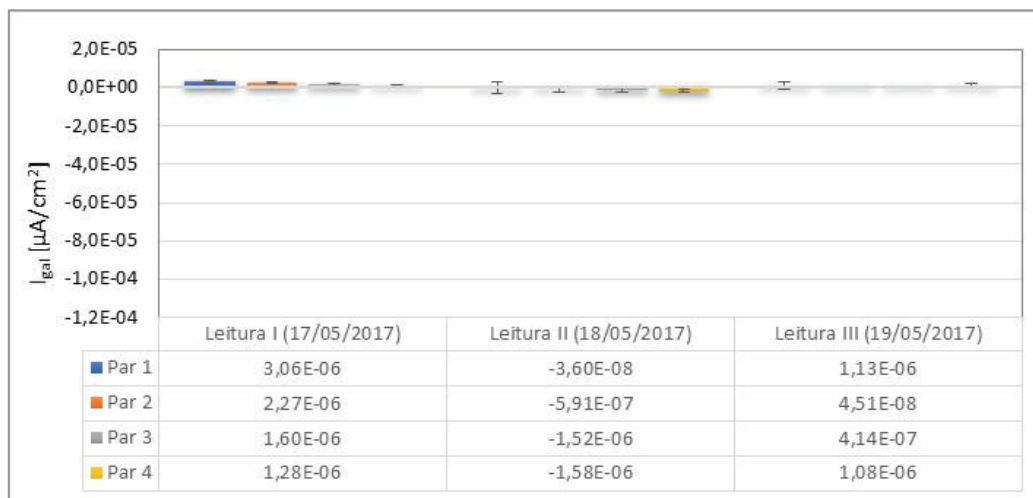
Comparando estes dados de corrente galvânica com os de Potencial do par (E_{par}), pode-se afirmar que I_{gal} apresenta uma maior inércia para a identificação da atividade de corrosão causada pela contaminação do meio com íons cloretos.

Figura 44: Quinto conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor A com Cl^- .



Fonte: Autor (2018)

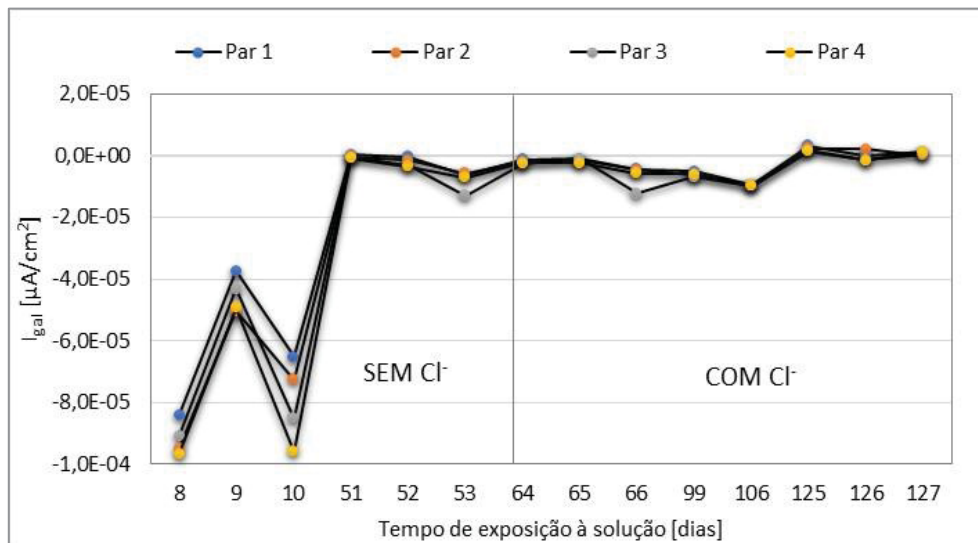
Figura 45: Médias do quinto conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor A com Cl^- .



Fonte: Autor (2018)

A Figura 46 reúne todos os valores médios de corrente galvânica no Sensor A com o intuito de mostrar uma visão global do comportamento desse parâmetro durante os cinco conjuntos.

Figura 46: Comportamento da corrente galvânica no Sensor A ao longo do tempo.

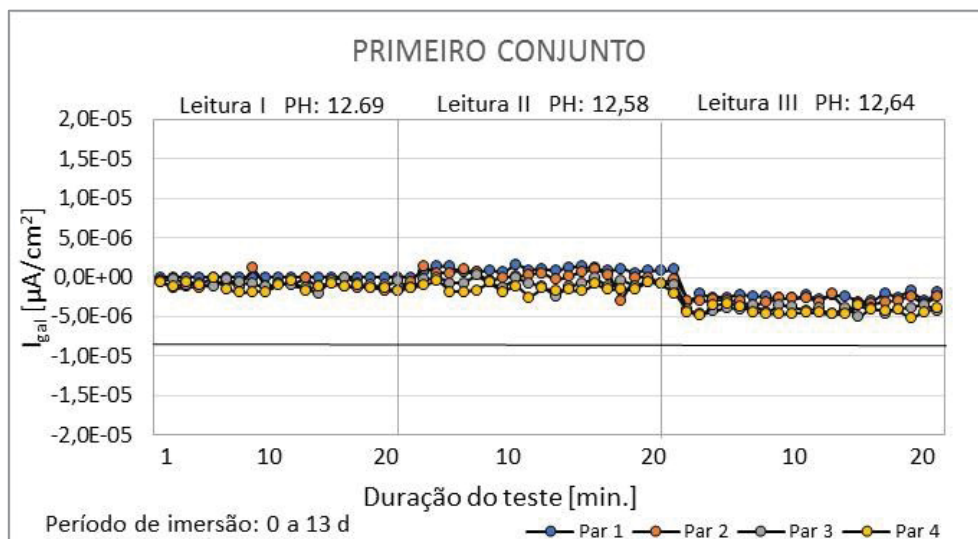


Fonte: Autor (2018)

4.1.2.2 Sensor B

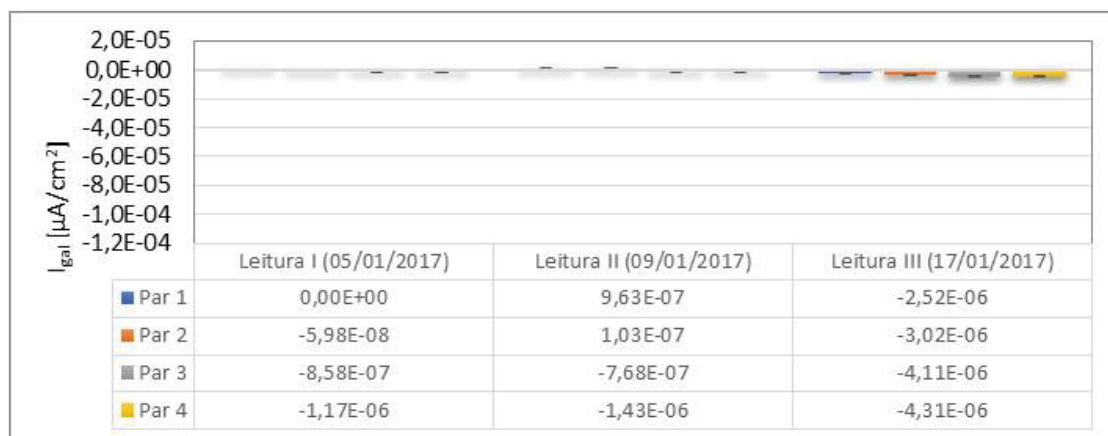
O comportamento do Sensor B durante o primeiro conjunto é mostrado nas Figuras 47 e 48. Nas leituras I e III deste conjunto o comportamento da corrente galvânica no Sensor B foi negativa, semelhante ao comportamento que teve no Sensor A. Destaca-se a Leitura II porque durante a mesma a corrente gerada nos pares 1 e 2 foi positiva.

Figura 47: Primeiro conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor B sem Cl^- .



Fonte: Autor (2018)

Figura 48: Médias do primeiro conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor B sem Cl⁻.



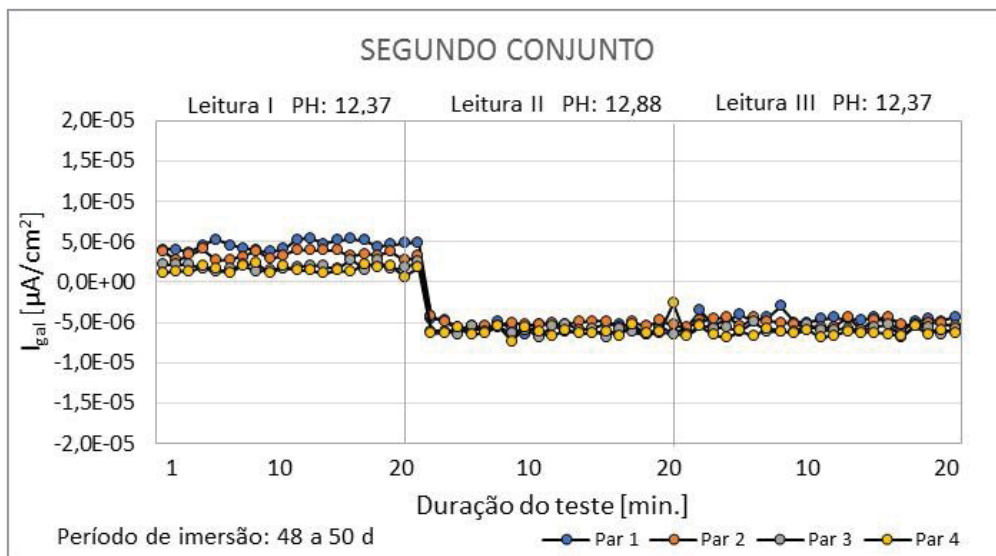
Fonte: Autor (2018)

As Figuras 49 e 50 mostram as leituras de corrente galvânica durante o segundo conjunto de leituras, onde se destaca a Leitura I durante a qual a corrente gerada em todos os pares foi positiva, ver Figura 51. Porém, todas as leituras passaram a ser negativa nas leituras II e III. Este comportamento de alternância de I_{gal} entre valores positivos e negativos indica uma instabilidade do sistema que pode ser causada pelo processo de formação da película passivadora, que segundo Helene (1993) é característico do aço imerso em meio de pH acima de 12.

Esses resultados de corrente galvânica positivos estão em concordância com os resultados do potencial do par (E_{par}), os que se mostraram positivos indicando uma reação ativa nos pares deste Sensor B já no segundo conjunto de leituras do E_{par} (Ver Figuras 28 e 29). Lembrando que se tratando de sensores galvânicos se o potencial do par é positivo significa que o processo de corrosão entre eles será espontâneo na presença de agentes agressivos e a densidade de corrente total será positiva.

É importante destacar que durante esse segundo conjunto, da mesma forma que no Sensor A (Ver Figura 38 e 39), os valores registrados são ligeiramente maiores dos do que os registrados durante o primeiro conjunto, já que se tornam menos negativas. Desse modo, as leituras de ambos sensores resultaram ser muito baixas, quase desprezíveis na ausência de agentes agressivos.

Figura 49: Segundo conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor B sem Cl^- .



Fonte: Autor (2018)

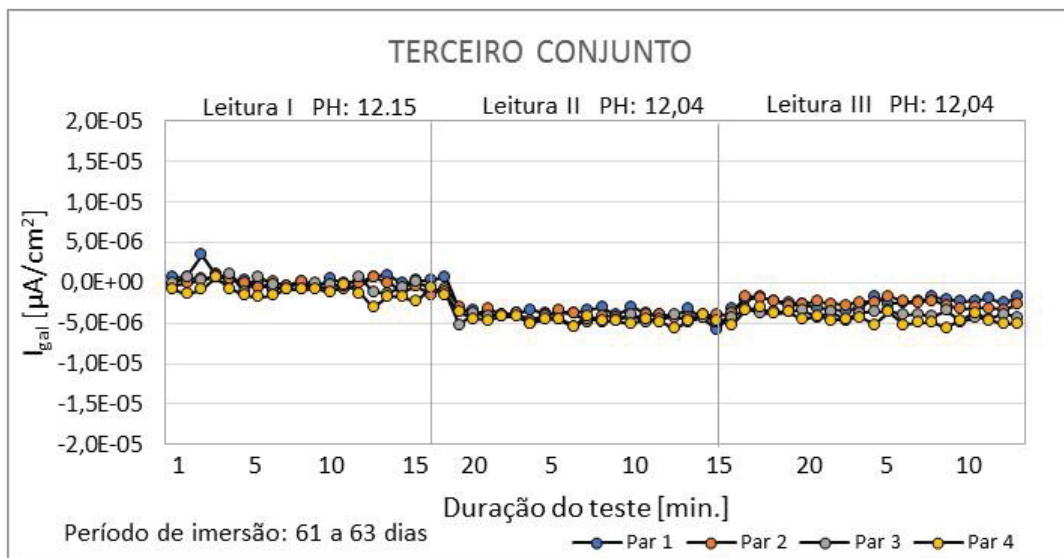
Figura 50: Médias do segundo conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor B sem Cl^- .



Fonte: Autor (2018)

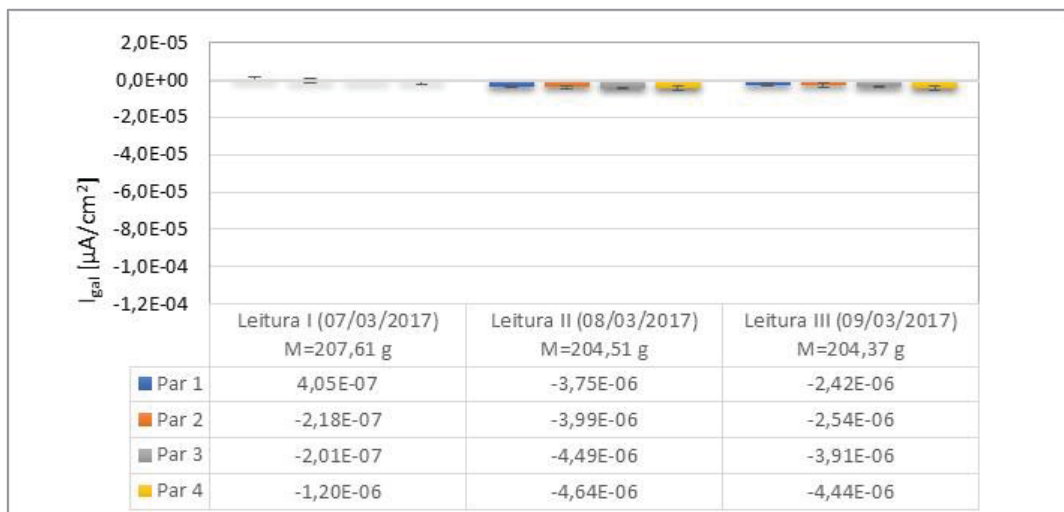
As Figuras 51 e 52 mostram o terceiro conjunto de leituras de corrente galvânica do Sensor B, em que a contaminação de 3,5% de NaCl foi introduzida. No terceiro conjunto excetuando a leitura de corrente gerada no Par 1, as demais leituras foram negativas. Desse modo, as leituras de corrente galvânica continuaram sendo muito baixas, em ambos os sensores mesmo após da adição de cloreto na solução aquosa saturada de hidróxido de cálcio. Novamente, é provável que este comportamento seja resultado do valor alto de pH da solução, o qual ficou acima de 12 ainda durante o terceiro conjunto de leituras para ambos os sensores, conforme mostram as Figuras 23 e 53.

Figura 51: Terceiro conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor B com Cl^- .



Fonte: Autor (2018)

Figura 52: Médias do terceiro conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor B com Cl^- .



Fonte: Autor (2018)

Note-se, que o pH da solução aquosa onde ficou submerso o Sensor A se manteve estável na faixa de 12 a 13, conforme mostra a Figura 23, já que foi necessário adicionar $Ca(OH)_2$ antes de começar o segundo conjunto de leituras para manter o pH da solução na faixa de valores desejados. Dessa forma, a reserva alcalina dessa solução terminou sendo maior. Matrizes com maior potencial alcalino possuem maior teor de OH^- e uma maior quantidade de cloretos é necessária para atingir a mesma relação $[Cl^-]/[OH^-]$ (FIGUEREDO e MEIRA, 2013). Nesse caso, foi adicionado a ambas soluções a mesma quantidade de NaCl (3,5 % em massa).

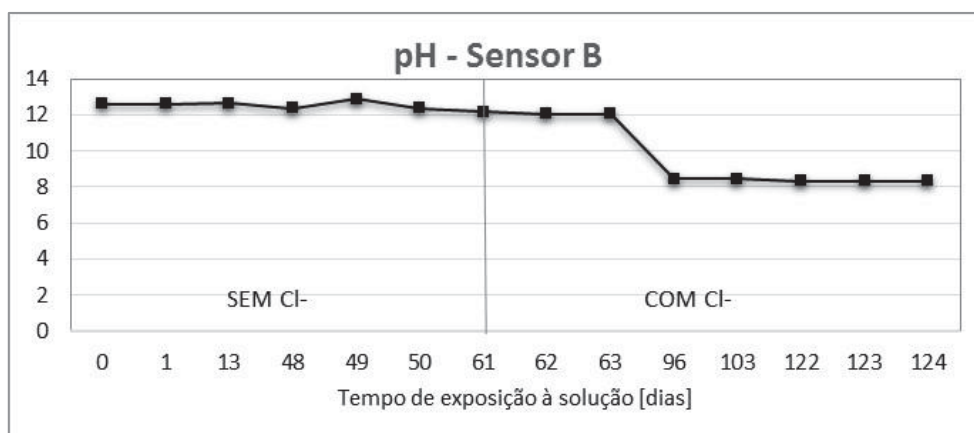
O Ca(OH)_2 é uma base forte formada por metais alcalino-terrosos pouco solúveis em água (SOUZA, 2018) o que provocou que o Ca(OH)_2 se assentasse no fundo do recipiente e em consequência que o pH da solução aquosa onde o Sensor B ficou imerso, com menor reserva alcalina, diminuísse após 63 dias. Além do explicado com relação ao Ca(OH)_2 a introdução de cloretos também influenciou nesse sentido.

Várias teorias tentam explicar o processo de despassivação da armadura pela ação de íons. Uma delas expõe que uma vez iniciado o processo corrosivo, os íons cloretos se combinam inicialmente com os íons Fe^{2+} , formando FeCl_2 . Através da hidrólise desses produtos, os Cl^- são liberados para novas reações. Nesse processo também são liberados íons H^+ . A liberação de H^+ faz com que a área anódica se torne mais ácida e o potencial mais negativo. Por outro lado, a formação de OH^- em função das reações catódicas, eleva o pH dessas áreas. Assim, a corrosão por pites é autossustentada, diminuindo o pH nas áreas anódicas e aumentando nas áreas catódicas (FIGUEREIDO e MEIRA, 2013; MEIRA, 2017).

Normalmente, em estruturas reais o concreto oferece uma proteção física que separa o aço do meio externo e uma proteção química em função do seu elevado pH (MEIRA, 2017) pelo que a diminuição do pH na área anódica é praticamente desprezível, no caso que realmente aconteça.

Porém, nessa primeira etapa do programa experimental uma vez que foi adicionado NaCl (3,5 % em massa) à solução aquosa de Ca(OH)_2 , os sensores ficaram expostos diretamente à ação de íons cloretos sem a proteção física adicional que oferece o concreto em uma estrutura de concreto armado facilitando a ação dos íons cloretos sobre o metal e por tanto, as reações associadas ao ânodo.

Figura 53: Valor do pH da solução aquosa de Ca(OH)_2 ao longo do tempo. Sensor B.



Fonte: Autor (2018)

No quarto conjunto de leituras, mostrado nas Figuras 54 e 55, o valor de pH da solução de hidróxido de cálcio é menor do que 11,5, contudo as leituras de corrente galvânica ficaram negativas. De acordo com Meira (2017), para pHs da solução dos poros do concreto acima de 11,5, a estabilidade da película de passivação se mantém inalterada e o processo de corrosão não se instala.

Um dos fatores que pode ter determinado esse comportamento é o baixo teor de oxigênio disponível já que o Sensor B durante todo o experimento ficou totalmente submerso na solução. Segundo Huafu *et al.*, (2015), a pouca disponibilidade de oxigênio pode reduzir a corrente galvânica a zero. Pereira *et al.*, (2009) expõem outro fator plausível: a formação dos óxidos na superfície do eletrôdo de trabalho, pode diminuir o valor da I_{gal} com o tempo, por agir como uma camada que dificulta o progresso da corrosão.

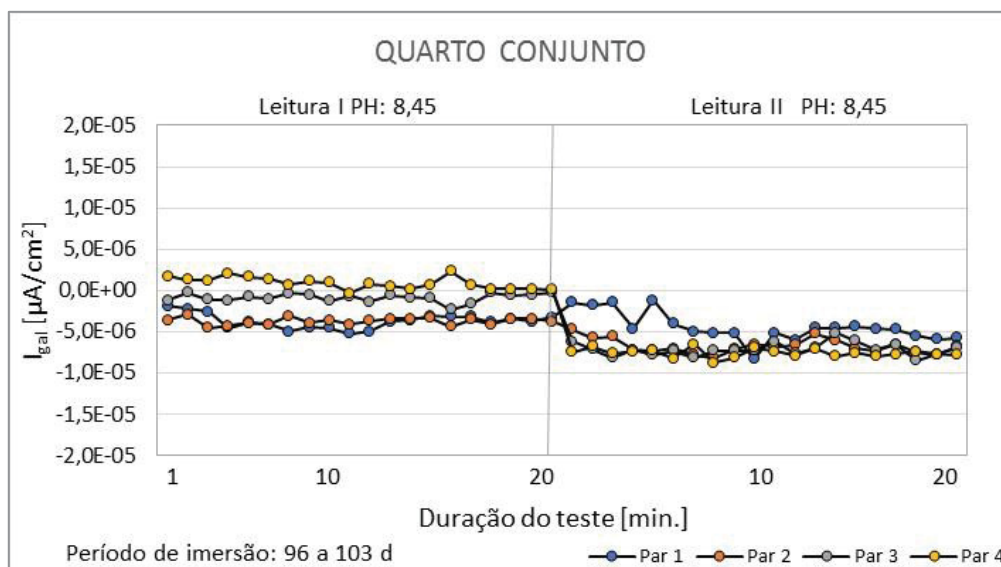
Segundo Park *et al.*, (2003), o fato da corrente galvânica diminuir ao longo do tempo, após a quebra da capa de passivação do aço, está intimamente relacionado com a presença de cristais de $Ca(OH)_2$ na superfície do aço. Os cristais de $Ca(OH)_2$ podem restringir uma queda de pH na superfície de aço. Os cristais proporcionam assim proteção contra a corrosão do aço.

Para comprovar essa teoria seria necessário, por exemplo, estudar a morfologia da superfície e o espectro XPS (espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X, ou XPS (do inglês *X-ray photoelectron spectroscopy*) do aço de reforço após o teste de imersão. Neste caso, foram obtidas imagens de áreas específicas das barras através de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) e a composição elementar por meio da técnica de espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Os resultados desses ensaios são mostrados no Anexo A.

Tanto Park *et al.*, (2003) como Pereira *et al.* (2009) fazem menção a processos ou fatores que diminuem a área do metal. Os dados de massa registrados no terceiro e quarto conjunto confirmam a perda de área neste caso, a saber 1,49% e 1,56% na Leitura I e II do terceiro conjunto respectivamente e 1,66% no quarto conjunto.

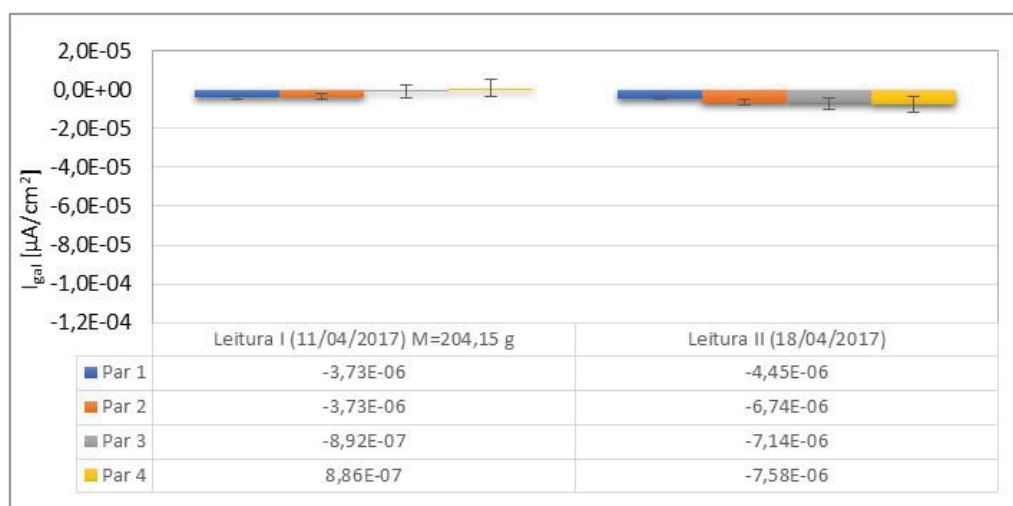
Geralmente, se a área de metal for diminuída, as curvas para ambas as reações associadas (dissolução anódica e redução catódica em metal) se movem para valores inferiores de corrente proporcionais à diminuição da área (BUCHANAN *apud* PARK *et al.*, 2003).

Figura 54: Quarto conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor B com Cl^- .



Fonte: Autor (2018)

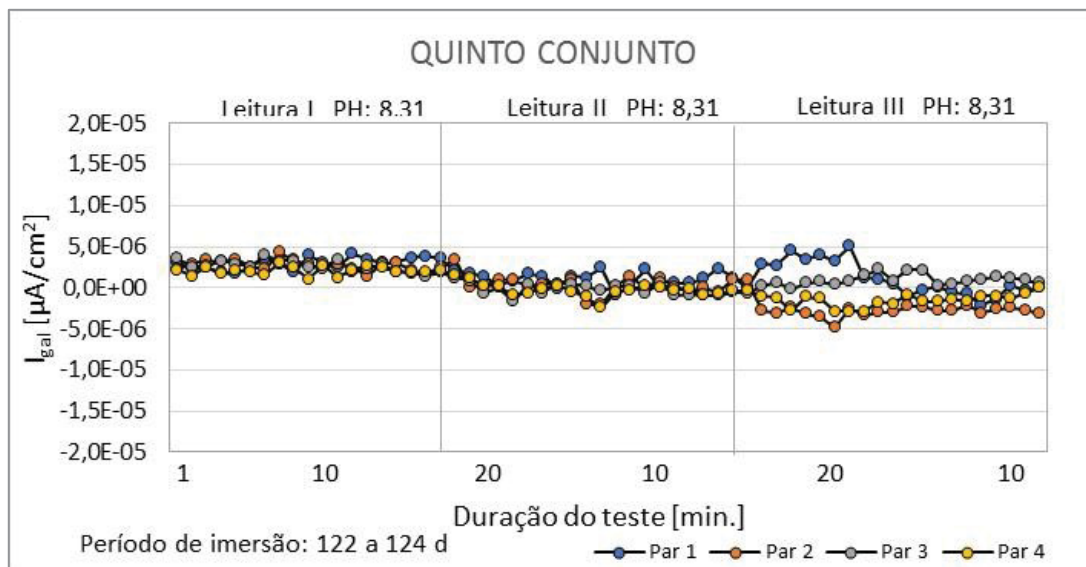
Figura 55: Médias do quarto conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor B com Cl^- .



Fonte: Autor (2018)

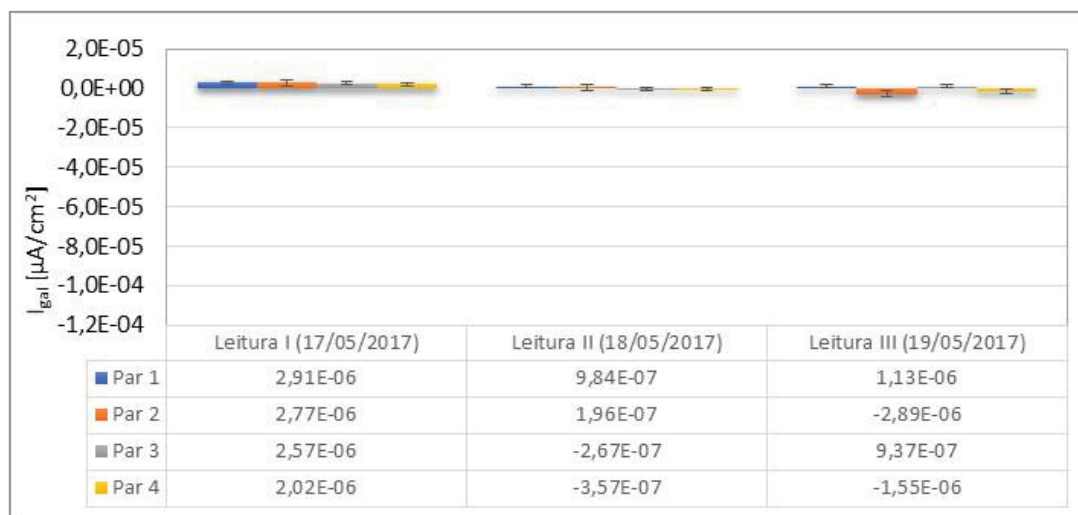
As Figuras 56 e 57 mostram os resultados obtidos no quinto conjunto deste Sensor B. Neste momento de leituras, os valores de corrente galvânica se mostram positivos na Leitura I. Nessa leitura todos os pares apresentaram valores positivos de corrente galvânica e os valores registrados resultaram ser maiores do que os registrados na Leitura I do quinto conjunto do Sensor A.

Figura 56: Quinto conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor B.



Fonte: Autor (2018)

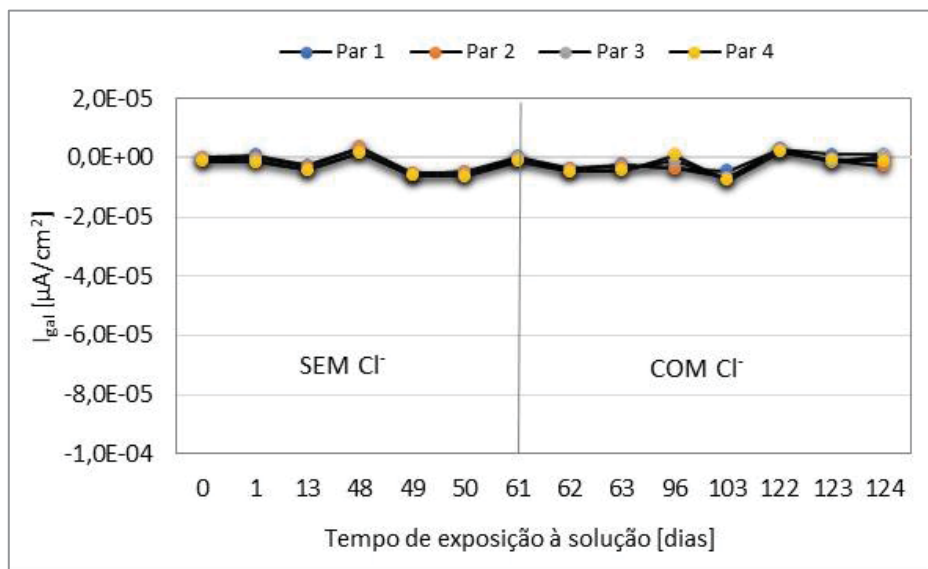
Figura 57: Médias do quinto conjunto de leituras da I_{gal} . Sensor B.



Fonte: Autor (2018)

A Figura 58 reúne todos os valores médios de corrente galvânica no Sensor B com o intuito de mostrar uma visão global do comportamento desse parâmetro durante os cinco conjuntos. Assim como no Sensor A, a I_{gal} ficou perto de zero ao longo do experimento.

Figura 58: Comportamento da corrente galvânica no Sensor B ao longo do tempo.



Fonte: Autor (2018)

4.1.3. Ensaios MEV e EDS

No Anexo A estão as figuras que mostram as imagens obtidas através de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) das barras dos Sensores A e B. Além disso, estas figuras também mostram as imagens obtidas com um Microscópio óptico comum. Inicialmente, foram selecionadas as áreas mais afetadas das barras dos sensores de forma visual e qualitativa. O MEV utilizado na pesquisa também forneceu a possibilidade de usar a espectroscopia de energia dispersiva (EDS) em um ponto das regiões escolhidas, de modo a identificar os compostos elementares que existiam no objeto de análise. Após ter desmontados os sensores as barras foram numeradas de forma aleatória já que a única diferença entre as barras era sua posição com relação à placa de cobre no sensor.

4.1.3.1 Sensor A

O resultado do ensaio de EDS é um histograma onde no eixo Y é plotada a energia dos fótons (keV) e no eixo X o número de fótons recebidos (contagens). A partir desse histograma é possível estimar a concentração dos componentes químicos existentes na superfície da barra.

Nesse caso, a investigação por EDS realizada nas quatro barras do Sensor A indica a presença de Cloro (Cl) e Sódio (Na), Ferro (Fe), Oxigênio (O) e Cálcio (Ca) nas quatro barras. Sendo a composição elementar das regiões estudadas semelhantes.

As maiores porcentagens de Cloro (Cl) e Sódio (Na) foram observadas nas Barras 1 e 4. Os resultados do ensaio de EDS mostraram a presença de 34,28 % de Cloro (Cl) e 27,05 % de Sódio (Na) na Barra 1, e na Barra 4, em porcentagens de 40,13 % e 31,57 %, respectivamente. Dessa forma, a substância química que predomina nas regiões analisadas na superfície dessas barras, é o NaCl.

Entretanto, as porcentagens achadas de Cloro (Cl) e Sódio (Na) na Barra 2 foram 13,22 % e 15,97 %, respectivamente. Enquanto que na Barra 3: 10,58 % e 6,23 %, respectivamente.

A presença de Ferro (Fe) e Oxigênio (O) indica a presença de uma camada de produtos de corrosão na superfície das barras. Como exposto anteriormente, segundo Pereira *et al.*, (2009), a formação de óxidos na superfície do eletrôdo de trabalho pode diminuir o valor da I_{gal} com o tempo, por agir como uma camada que dificulta o progresso da corrosão.

As maiores porcentagens de Ferro (Fe) e Oxigênio (O) foram observadas nas Barras 2 e 3. No espectro da Barra 2 observa-se o Ferro (Fe) e o Oxigênio (O) em porcentagens de 15,81 % e 21,25 %, respectivamente. Na Barra 3 os resultados do ensaio de EDS mostraram a presença de 10,69 % de Ferro (Fe) e 35,33 % de Oxigênio (O).

Na Barra 1 observa-se 11,04 % de Ferro (Fe) e o 8,01 %, de Oxigênio (O). Finalmente, no espectro da Barra 4 observa-se o Ferro (Fe) e o Oxigênio (O) em porcentagens de 8,44 % e 5,33 %, respectivamente.

A concentração de Cálcio (Ca) nas Barras 1, 2, 3 e 4 resultou ser de 3,93 %, 10,77 %, 5,43 % e 1,32 % respectivamente, pelo que provavelmente ainda existiam cristais de $Ca(OH)_2$ na região analisada.

Finalmente, a partir dos resultados obtidos através do ensaio de EDS pode-se constatar que nas barras 1 e 4 do sensor a substância química que predominava era o NaCl. Enquanto que nas barras 2 e 3 predominavam óxidos.

4. 1. 3. 2 Sensor B

Assim como no Sensor A, a investigação por EDS realizada nas quatro barras do Sensor B, indica a presença de Cloro (Cl) e Sódio (Na), Ferro (Fe), Oxigênio (O) e Cálcio (Ca). Sendo a composição elementar das regiões estudadas semelhante nas quatro barras. Novamente, se comprovou a formação de uma camada de óxidos na superfície das barras e a presença de cristais de $Ca(OH)_2$.

As maiores porcentagens de Cloro (Cl) e Sódio (Na) foram observadas nas Barras 2 e 3. Na Barra 2 a concentração de Cloro (Cl) resultou ser de 21,55 % e a de Sódio (Na) de 17,77 %. Na Barra 3 o espectro mostra 15,88 % de Cloro (Cl) e 12,06 % de Sódio.

Entretanto, as porcentagens achadas de Cloro (Cl) e Sódio (Na) na Barra 1 foram 3,9 % e 3,2 %, respectivamente. Enquanto que no espectro da Barra 4 se observa 9,1 % de Cloro (Cl) e 7,7 % de Sódio (Na).

As concentrações de Ferro (Fe) e Oxigênio (O) na Barra 3 também foram altas. De forma tal que as maiores porcentagens desses elementos químicos foram observadas nas Barras 1 e 3. Na Barra 1 observa-se 24,9 % de Ferro (Fe) e 32,4 % de Oxigênio (O). No ponto analisado na Barra 3 a concentração de Ferro (Fe) foi de 18,52 % e a de Oxigênio (O) de 20,10 %.

Na Barra 2, de forma semelhante às barras 1 e 4 do Sensor A. Os resultados do ensaio de EDS mostraram a presença de 7,37 % de Ferro (Fe) e o 9,13 % de Oxigênio (O). Na Barra 4 um dos elementos químicos com maior concentração foi o Oxigênio (O) com 28,7%, porém, a concentração de Ferro (Fe) no histograma foi só de 6,4 %.

A concentração de Cálcio (Ca) nas Barras 1, 2, 3 e 4 resultou ser de 10,6 %, 2,1 %, 6,89 % e 21,7 % respectivamente, pelo que provavelmente ainda existiam cristais de Ca(OH)_2 nas regiões analisadas.

Nas Barras 1 e 3, se observaram as maiores concentrações de Ferro e Oxigênio. Enquanto que as maiores concentrações de Cloro e Sódio se observam na Barra 2.

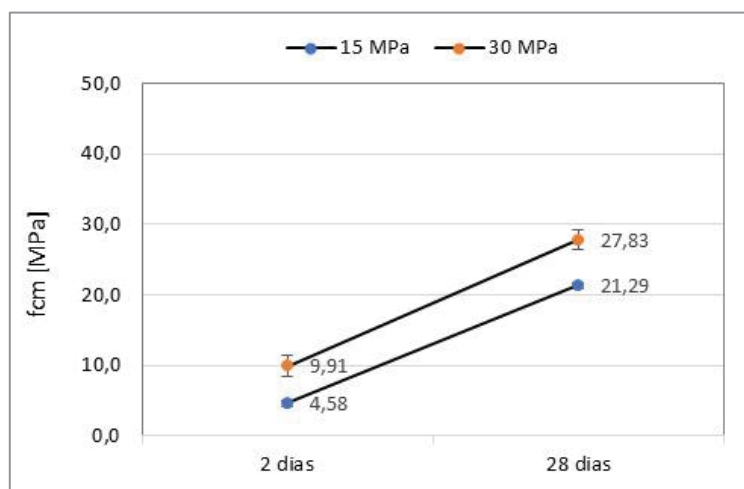
4.2. SEGUNDA ETAPA – TESTES EM CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO.

4.2.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi feito de acordo com a norma ABNT NBR 5739:2007. Foram rompidos 12 corpos de prova de cada um dos blocos, que foram mantidos na cura úmida até as idades de ensaio. Do Bloco I foram ensaiados seis corpos de prova com 2 dias de idade e seis com 28 dias. Entretanto, do Bloco II foram ensaiados seis corpos de prova aos 28 dias e seis aos 91 dias. Em cada caso, foram rompidos três corpos de prova do traço de fck de 15 MPa e três do traço de fck de 30 MPa.

As tabelas com os resultados obtidos nos corpos de prova do Bloco I, aos 2 dias de idade e aos 28 dias de idade, estão no Anexo B. A Figura 59 mostra os resultados de resistência à compressão média (fcm) em [MPa] correspondentes. Note-se que os corpos de prova do traço 30 MPa do Bloco I não atingiram a resistência à compressão esperada aos 28 dias.

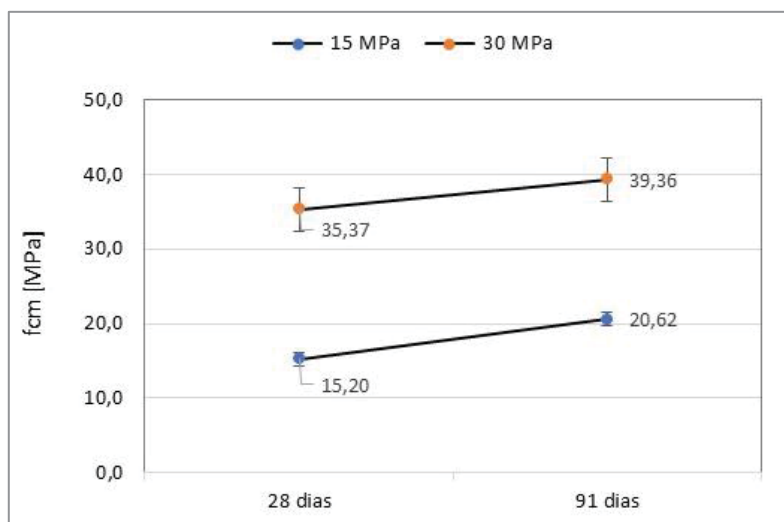
Figura 59: Resistência à compressão média (f_{cm}) em [MPa] aos 2 e 28 dias do Bloco I.



Fonte: Autor (2018)

As tabelas que mostram os resultados obtidos nos corpos de prova do Bloco II, aos 28 dias de idade e aos 91 dias de idade, também estão no Anexo B. A Figura 60 mostra os resultados de resistência à compressão média (f_{cm}) em [MPa] correspondentes.

Figura 60: Resistência à compressão média (f_{cm}) em [MPa] aos 28 e 91 dias do Bloco II.



Fonte: Autor (2018)

4.2.2 Absorção de água por capilaridade

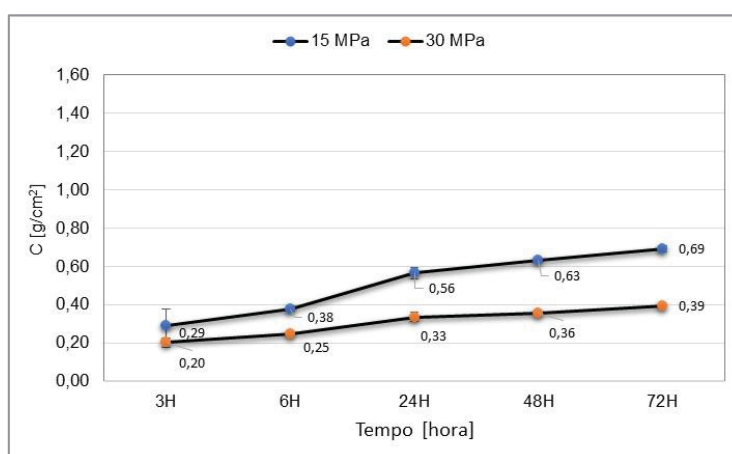
Este ensaio teve como objetivo estimar a capacidade de absorção de água por capilaridade nos concretos usados na moldagem dos corpos de prova. Para isto, seguiu-se os procedimentos estabelecidos na NBR 9779:2012. Quando os períodos de cura chegaram ao fim, os corpos de prova foram

colocados na estufa durante cinco dias a 60 °C. Posteriormente, os corpos de prova secos foram colocados sobre suportes em um recipiente que foi preenchido com água, de modo que o nível de água permaneceu constante em 5 ± 1 mm acima da face apoiada dos corpos de prova.

A resposta do ensaio foi medida a partir da pesagem dos corpos de prova, após secar levemente a superfície que esteve em contato com a água ao longo do tempo de exposição para eliminar o excesso de água. Estas pesagens foram realizadas nos tempos de 3 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72 h.

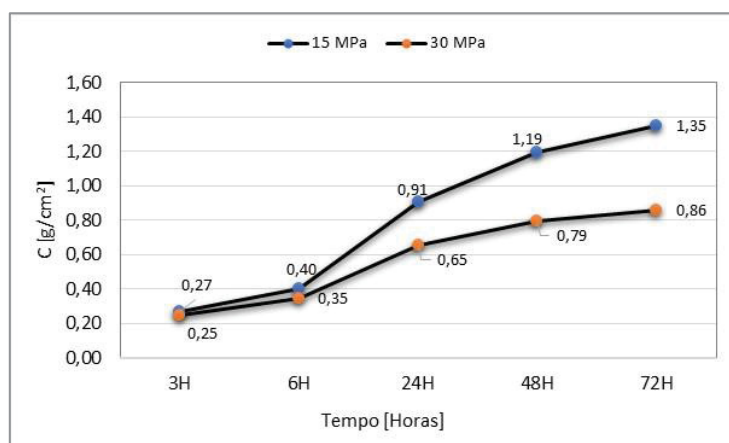
Em cada traço foram empregados três corpos de prova e a Figura 61 mostra a média dos valores de absorção de água através da ascensão capilar (C) [g/cm²] ao longo do ensaio, no Bloco I. Além disso, na Figura 62 são mostrados os valores médios de C [g/cm²] obtidos nos corpos de prova do Bloco II.

Figura 61: Absorção de água por capilaridade dos traços 15 e 30 MPa do Bloco I, tempo de cura de 1 dia.



Fonte: Autor (2018)

Figura 62: Absorção de água por capilaridade dos traços 15 e 30 MPa do Bloco II, tempo de cura de 91 dias.



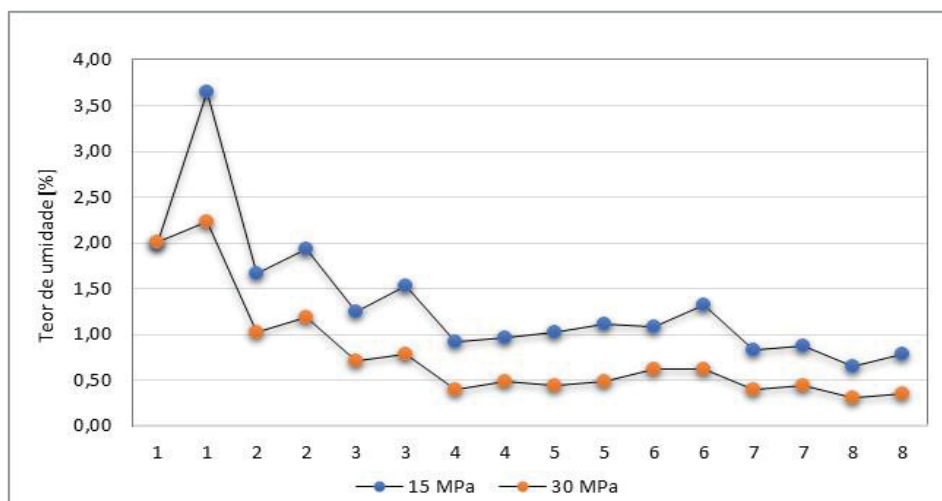
Fonte: Autor (2018)

Nas figuras é possível observar que, os corpos do traço 15 MPa apresentaram maior capacidade de absorção em comparação com os corpos de prova do traço 30 MPa. Dessa forma, a variação da relação água cimento (a/c) e quantidade de cimento a fim de obter dois concretos com resistência à compressão diferentes, influenciou de forma significativa na capacidade de absorção dos corpos de prova. O que foi comprovado na análise estatística realizada através do teste de Turkey e um intervalo de confiança de 95 %. Também segundo análise estatística, a diferença entre os tempos de cura não influenciou significativamente na capacidade de absorção, os resultados obtidos no Bloco I são estatisticamente equivalentes aos resultados do Bloco II, de ambos traços. Resultados semelhantes se observaram durante o controle do teor de umidade ao longo do processo de envelhecimento acelerado.

4.2.3 Controle de umidade nos corpos de prova durante o processo de envelhecimento acelerado

A Figura 63 mostra os teores de umidade em [%] registrados nos corpos de prova do Bloco I, ao longo dos oito ciclos de envelhecimento. Os maiores teores de umidades foram registrados no primeiro ciclo de envelhecimento. Em todos os ciclos o teor de umidade resultou maior no segundo dia de imersão. Os valores obtidos no quarto e quinto ciclo resultaram ser semelhantes. Isto, se observou em ambos traços.

Figura 63: Teores de umidade em [%] registrados nos corpos de prova do Bloco I (1 d) nos oitos ciclos de imersão e secagem.



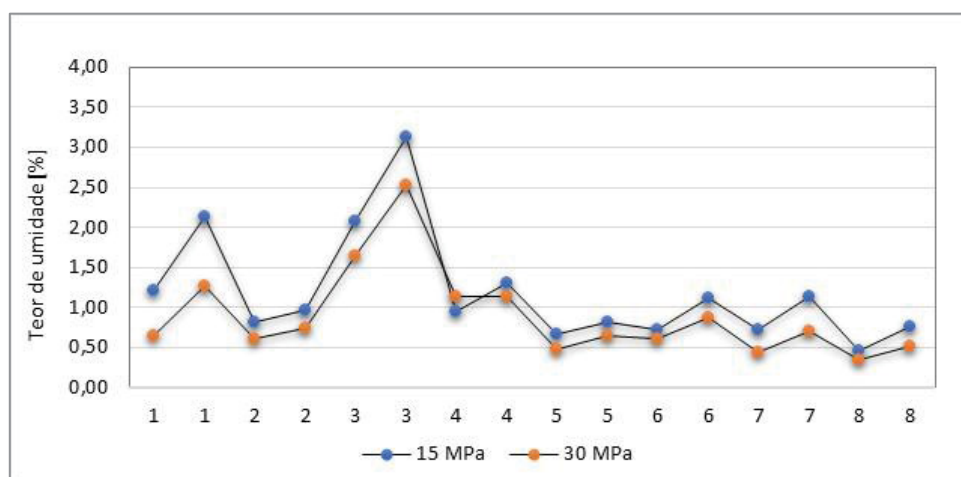
Fonte: Autor (2018)

Aparentemente, os teores de umidade adquiridos nos corpos de prova do traço 30 MPa, foram menores dos observados nos corpos de prova do traço 15 MPa em ambos blocos. Isto significa, que os corpos do traço 15 MPa apresentaram maior capacidade de absorção ao longo do ensaio acelerado em comparação com os corpos de prova do traço 30 MPa.

Dessa forma, a variação da relação água cimento (a/c) e quantidade de cimento a fim de obter dois concretos com resistência à compressão diferentes, influenciou de forma significativa na capacidade de absorção dos corpos de prova nesse Bloco I. O que foi comprovado na análise estatística.

A Figura 64 mostra os teores de umidade em [%] registrados nos corpos de prova do Bloco II, ao longo dos oito ciclos de envelhecimento. Os maiores teores de umidade foram obtidos no terceiro ciclo já que os corpos estavam 100 % secos quando se iniciou o mesmo; tinham ficado na estufa durante 96 dias desde o fim do segundo ciclo até o começo do terceiro. No geral, os teores de umidade registrados nesses corpos de prova do Bloco II, foram semelhantes aos observados nos corpos de prova do Bloco I.

Figura 64: Teores de umidade em [%] registrados nos corpos de prova do Bloco II (91 d) nos oito ciclos de envelhecimento.



Fonte: Autor (2018)

A análise estatística mostrou que os teores de umidade dos corpos de prova do Bloco I, de ambos os traços, só foram estatisticamente nos ciclos 1, 2 e 4. No Bloco II, os teores de umidade dos corpos de prova foram estatisticamente equivalentes nos ciclos 2, 3 e 4. Não foram nos restantes cinco ciclos. Por tanto, o tipo de concreto influenciou na variação do teor de umidade em ambos blocos. Para a comparação de médias, foi usado o teste de Turkey e um intervalo de confiança de 95 %.

Brandão e Pinheiro (1999) indica que todos os fatores que afetam a porosidade do concreto interferem também na sua permeabilidade e capacidade de absorção e, portanto, na sua resistência ao ataque químico. Segundo o autor, dentre estes fatores, destacam-se: relação água/cimento; quantidade, composição e finura do cimento; aderência entre pasta e o agregado; presença e quantidade de adições e de aditivos; qualidade da execução; etc. Sendo assim nessa pesquisa os fatores que poderiam ter determinado o comportamento

representado nas Figuras 80 e 81, são: a relação água/cimento e quantidade do cimento.

Brandão e Pinheiro (1999) também comentam que assim como a porosidade a fissuração proporciona de igual modo facilidades para que os agentes agressivos penetrem no concreto e iniciem sua ação destruidora na estrutura. Após o endurecimento da massa as fissuras são resultado, entre outros fatores, de retração por secagem, movimentações de origem térmica ou de outras causas, tais como: reações álcali agregado, corrosão das armaduras, ciclo gelo/degelo, ciclo alternado de molhagem e secagem, recalques diferenciais do solo de fundação, etc.

Durante o ensaio acelerado, os corpos de prova foram expostos a ciclos alternados de molhagem e secagem para promover precisamente a corrosão da armadura e até o fim do experimento os corpos de prova do Bloco I apresentavam fissuras aparentes. Desse modo, acredita-se que as variações das condições de exposição influenciaram os resultados obtidos.

4.2.4 Potencial de corrosão nos corpos de prova prismáticos

A análise dos resultados de maneira a estimar as chances de corrosão dos ânodos do sensor assim como das barras de reforço dos corpos de prova, foi desenvolvida com base nas relações encontradas na norma ASTM C876-09 mostradas na Tabela 1. Com base nessa tabela se considerou que os ânodos do sensor e as barras estariam se corroendo com mais de 90% de probabilidade quando o valor de potencial de corrosão registrado fosse menor do que -350 mV já que no ensaio foi usado um eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO₄). Nas figuras com os resultados de E_{corr} se observam três curvas. Cada curva está composta pelos valores médios obtidos nas profundidades de 1,5 cm, 2,5 cm e 6 cm. As barras principais são identificadas como: B-A5 e B-A6.

4.2.4.1 Bloco I – 1 dia de cura úmida.

A Figura 65 mostra as três curvas de potencial de corrosão correspondentes aos ânodos instalados a 1,5 cm, 2,5 cm e 6 cm com relação à superfície exposta à penetração de cloretos do corpo de prova P-I-15-B1. Os corpos de prova deste Bloco I ficaram na cura úmida durante somente 1 dia.

O corpo de prova P-I-15-B1 só esteve em contato com a solução aquosa de NaCl durante 12 h no começo do ciclo 6. O resto do tempo o corpo de prova esteve parcialmente imerso em um recipiente com água.

Os valores de potencial de corrosão registrados nas barras a 6 cm oscilaram no intervalo de 0 a -150 mV até o começo do ciclo 6 quando ficaram menores do que -350 mV e estatisticamente equivalentes aos valores registrados

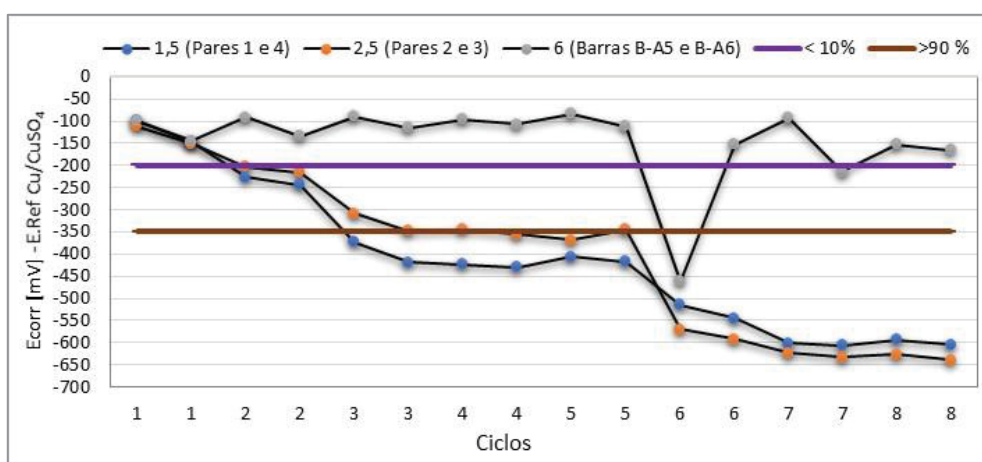
nos ânodos do sensor. Nos ciclos seguintes, durante os quais o corpo de prova só ficou em contato com água, os valores de potencial voltam a ser típicos de uma probabilidade de corrosão menor do que 10%.

Entretanto, os ânodos do sensor galvânico colocados a 1,5 cm sofreram despassivação no ciclo 3. O valor de potencial de corrosão nesses ânodos se manteve no intervalo de -350 a 450 mV até o ciclo 5 e se tornou ainda mais eletronegativo a partir da introdução de cloretos ao sistema aço-concreto no começo do ciclo 6.

Os ânodos colocados a 2,5 cm sofreram despassivação no ciclo 5. O potencial de corrosão mostrou uma tendência a ficar cada vez mais eletronegativo a medida que o experimento avançou. Diferente do observado nas barras com 6 cm de cobrimento, os ânodos do sensor com cobrimento menor continuaram em estado ativo com mais de 90 % de probabilidade.

Os cloretos não são consumidos no processo de quebra da película de passivação pelo que permitindo que o processo de corrosão avance rapidamente (MANCIO *et al.*, 2009). Se o cobrimento do aço no concreto é menor do que o cobrimento mínimo (c_{min}) recomendado pela norma, como é o caso, a concentração de cloretos em volta do aço pode rapidamente se tornar crítica e uma vez que chega nesse ponto o ânodo fica em estado ativo.

Figura 65: E_{corr} do P-I-15-B1 o qual esteve exposto a cloretos apenas no ciclo 6 dos oito ciclos de envelhecimento.



Fonte: Autor (2018)

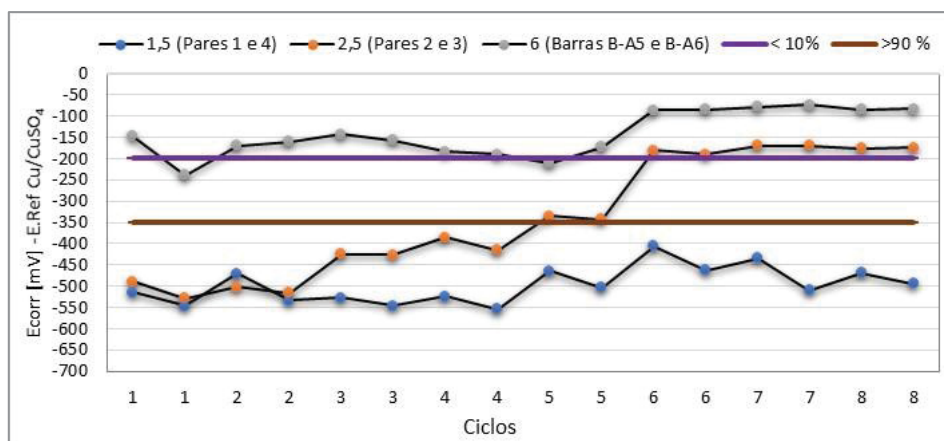
As Figuras 66, 67 e 68 mostram as três curvas de E_{corr} correspondentes aos ânodos instalados a 1,5 cm, 2,5 cm e 6 cm com relação à superfície exposta à penetração de cloretos nos corpos de prova P-II-15-B1, P-III-15-B1 e P-IV-15-B1, respectivamente. Esses corpos ficaram em contato com a solução aquosa de NaCl durante os oito ciclos de envelhecimento.

Nos três corpos de prova, as barras com 6 cm de cobrimento ficaram em estado passivo ou na zona de incerteza com valores de potencial de corrosão no

intervalo de -200 a -350 mV durante todo o experimento. Entretanto, os ânodos dos sensores galvânicos instalados a 1,5 e 2,5 cm se mostraram em estado ativo desde o ciclo 1 ou logo no ciclo 2 após 13 dias do início do experimento.

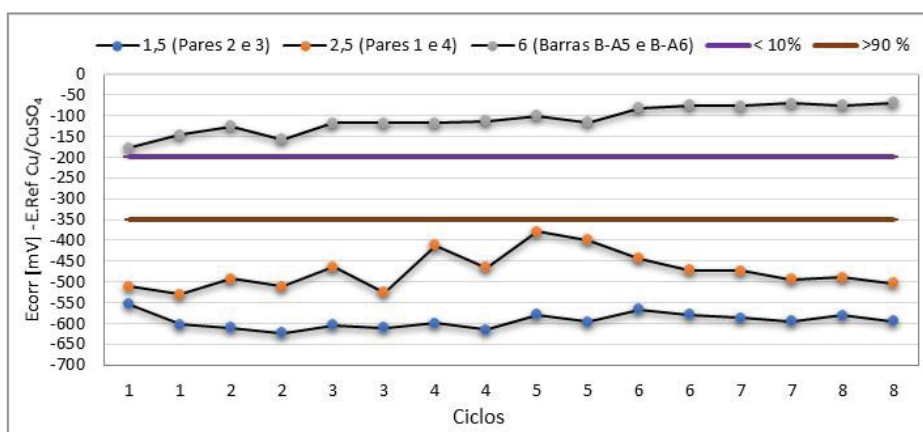
No corpo de prova P-II-15-B1, no entanto, os valores de potencial de corrosão dos ânodos a 2,5 cm, a partir do ciclo 6 ficaram menos eletronegativos do que -200 mV mostrando valores estatisticamente equivalentes com o E_{corr} das barras, conforme evidenciado na Figura 66.

Figura 66: E_{corr} do P-II-15-B1 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).



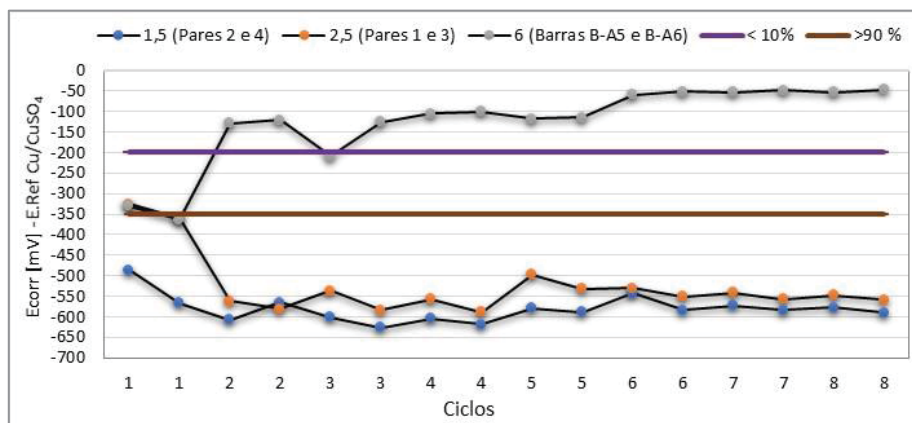
Fonte: Autor (2018)

Figura 67: E_{corr} do P-III-15-B1 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).



Fonte: Autor (2018)

Figura 68: E_{corr} do P-IV-15-B1 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).



Fonte: Autor (2018)

É necessário apontar que cada ciclo de envelhecimento esteve composto por 5 dias na estufa a 50 °C e 2 dias de imersão parcial durante os quais os testes foram desenvolvidos. Portanto, no começo do período de imersão a superfície dos corpos de prova estava seca.

Quando a superfície do concreto está seca, o mecanismo de transporte inicial dos íons cloretos para o interior do concreto é a sucção, e a água salgada é rapidamente absorvida. A seguir se produz um movimento capilar da água carregada de sal através dos poros, seguido de difusão. Os íons cloreto são higroscópicos, isto é, eles absorvem e retêm a umidade. Assim, uma vez no interior do concreto, eles ajudam a aumentar o teor de água nos poros, o que aumenta a condutividade elétrica do concreto e acelera o processo de corrosão (MANCIO *et al.*, 2009).

Logo após a compactação e durante o período de cura, o material de cobrimento é altamente alcalino com pH de aproximadamente 12,6. A partir da interrupção da cura, inicia-se o processo de envelhecimento (MEDEIROS *et al.*, 2011). Entretanto, o filme passivo se torna mais estável com imersão prolongada, ou seja, quanto mais tempo dura a cura por via úmida. Sendo assim, apesar do filme passivo se formar espontaneamente no ambiente alcalino do concreto, se a cura é interrompida a camada passiva é mais instável. (B. ELSENER e A. ROSSI, 2017).

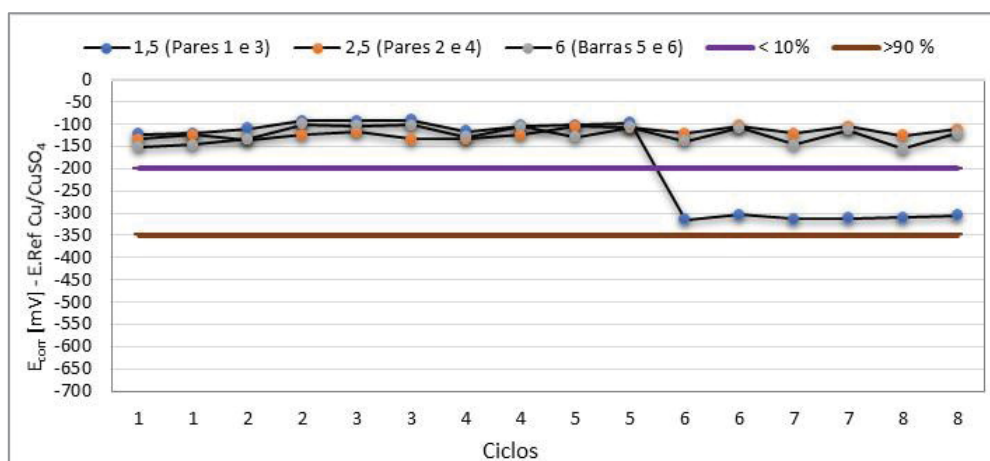
Os aspectos comentados anteriormente relacionados com os íons cloretos e seu comportamento como catalisadores do processo de corrosão, a estabilidade da camada passiva, assim como a utilização de cobrimentos menores do que o mínimo recomendado, podem ter determinado o aumento rápido do teor de cloretos em volta das barras dos sensores.

A Figura 69 mostra as três curvas de potencial de corrosão correspondentes aos ânodos instalados a 1,5 cm, 2,5 cm e 6 cm com relação à superfície exposta à penetração de cloretos do corpo de prova P-I-30-B1.

Todos os valores de potencial de corrosão ficaram acima de -200 mV até o ciclo 5. A partir do ciclo 6 o potencial de corrosão dos ânodos colocados a 1,5 cm se tornou mais eletronegativos do que -200 mV ficando na zona de incerteza até o fim do experimento. Tal que, a partir do ciclo 6 os valores registrados nesses ânodos se tornaram estatisticamente não equivalentes aos valores de E_{corr} dos ânodos a 2,5 cm e a 6 cm.

Da mesma forma que o corpo de prova P-I-15-B1, o corpo de prova P-I-30-B1 só esteve em contato com a solução aquosa de NaCl durante 12 h no começo do ciclo 6. O resto do tempo o corpo de prova esteve parcialmente imerso em um recipiente com água. É preciso ressaltar que este corpo de prova a diferença do P-I-15-B1 foi moldado com um traço diferente, com maior teor de cimento e menor relação a/c.

Figura 69: E_{corr} do P-I-30-B1 o qual esteve exposto a cloretos apenas no ciclo 6 dos oito ciclos de envelhecimento.



Fonte: Autor (2018)

As Figuras 70, 71 e 72 mostram as três curvas de potencial de corrosão correspondentes aos ânodos instalados a 1,5 cm, 2,5 cm e 6 cm com relação à superfície exposta à penetração de cloretos dos corpos de prova P-II-30-B1, P-III-30-B1 e P-IV-30-B1, respectivamente. Esses corpos ficaram em contato com a solução aquosa de NaCl durante os oito ciclos de envelhecimento. Quando começou o ciclo 1 os corpos tinham 25 dias de idade e no ciclo 2, 38 dias.

Nos três corpos de prova os valores de potencial de corrosão registrados nas barras principais com 6 cm de profundidade oscilaram no intervalo de 0 a -200 mV, indicando uma probabilidade de corrosão menor do que 10 % durante todo o experimento. Em nenhum momento os valores de potencial de corrosão

registrados nelas ficaram na zona de incerteza a diferença do acontecido nos corpos de prova do traço de 15 MPa.

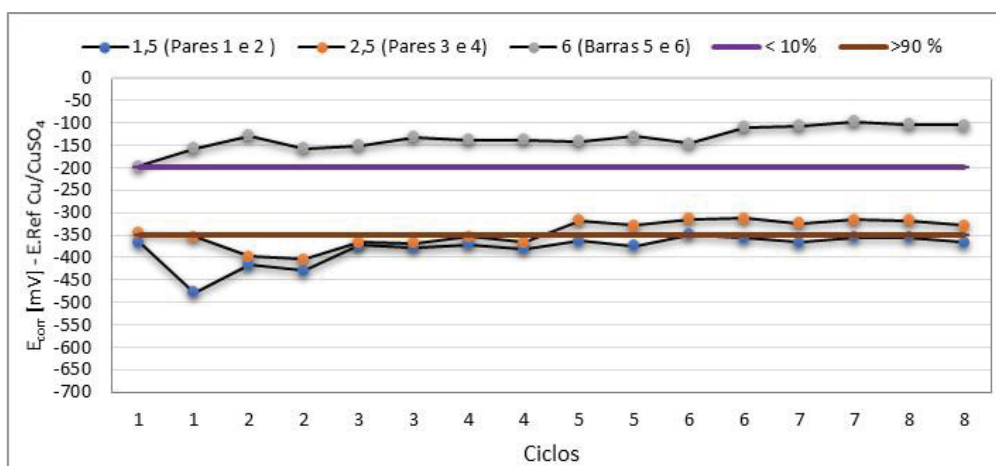
Os ânodos dos sensores colocados a 1,5 cm se mostraram em estado ativo desde o ciclo 1 nos corpos de prova P-II-30-B1 e P-III-30-B1. Entretanto, no corpo de prova P-IV-30-B1, os ânodos com 1,5 cm de profundidade passam ao estado ativo no ciclo 2, conforme mostra a Figura 72.

Os ânodos dos sensores colocados a 2,5 cm despассивaram logo no fim do ciclo 1 ou a partir do ciclo 2 após 13 dias do início do experimento, nos corpos de prova P-II-30-B1 e P-III-30-B1, com valores de E_{corr} acima dos observados nos ânodos instalados a 1,5 cm, chegando a ficar inclusive na zona de incerteza.

No entanto, de acordo com a análise estatística no corpo de prova P-II-30-B1, a partir do ciclo 2 os valores de E_{corr} dos quatro ânodos do sensor foram estatisticamente equivalentes entre si. Portanto, nesses ciclos os quatro ânodos do sensor estavam no mesmo estado. No corpo de prova P-III-30-B1 a partir do ciclo 3, os valores obtidos nos seis ânodos foram estatisticamente não equivalentes. Portanto, os ânodos com 2,5 cm de cobertura não estavam no mesmo estado que as barras.

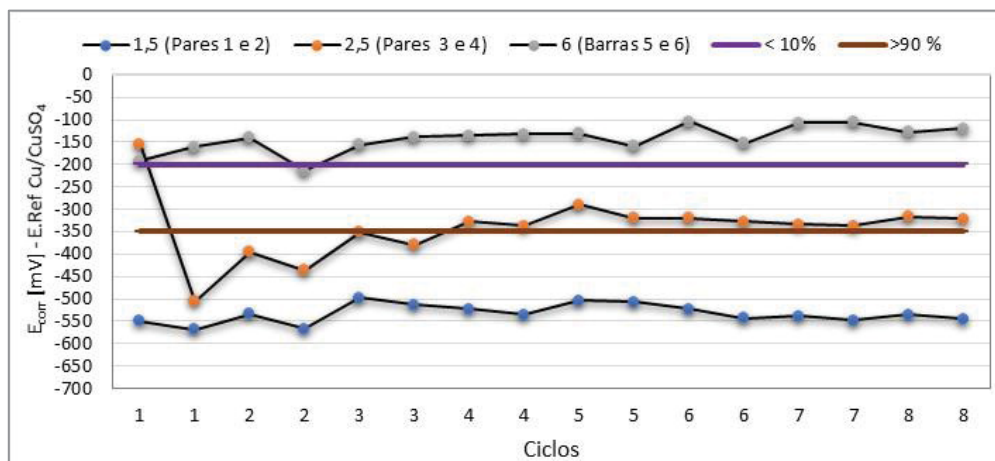
No corpo de prova P-IV-30-B1 o valor de potencial de corrosão dos ânodos colocados a 2,5 cm ficou na zona de incerteza até o ciclo 4, a partir do ciclo 5 se tornou mais eletronegativo do que -350 mV. Nos últimos quatro ciclos os valores de potencial de corrosão nos quatro ânodos do sensor foram estatisticamente equivalentes.

Figura 70: E_{corr} do P-II-30-B1 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).



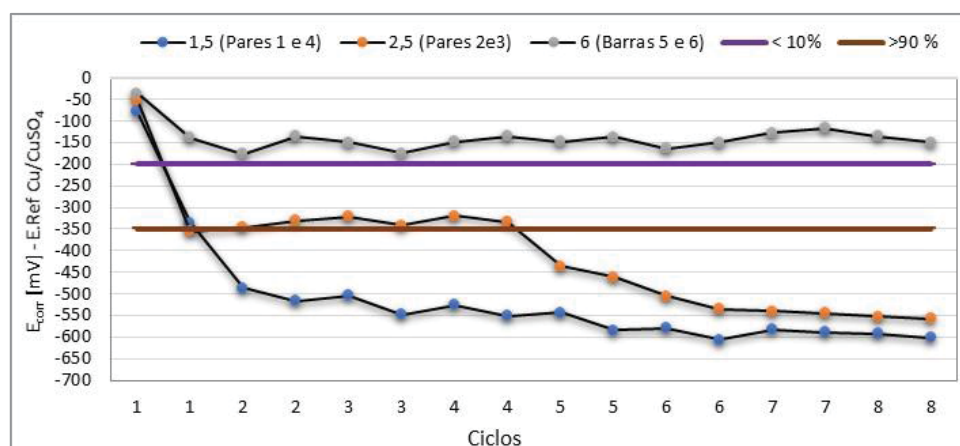
Fonte: Autor (2018)

Figura 71: E_{corr} do P-III-30-B1 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).



Fonte: Autor (2018)

Figura 72: E_{corr} do P-IV-30-B1 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).



Fonte: Autor (2018)

4.2.4.2 Bloco II – 91 dias de cura úmida

Da mesma forma que no Bloco I, para cada traço foram moldados quatro corpos de prova, mas do Bloco II foi preciso desconsiderar o corpo de prova P-II-15-B2 porque o sensor ficou instalado de forma invertida ao mostrado na Figura 6, com os ânodos na direção da face exposta ao ar e não na direção da frente de penetração de cloretos. Neste caso, todos os corpos ficaram em contato com a solução aquosa de NaCl durante os oito ciclos de envelhecimento.

As Figuras 73, 74 e 75 mostram as três curvas de potencial de corrosão correspondentes aos ânodos instalados a 1,5 cm, 2,5 cm e 6 cm com relação à superfície exposta à penetração de cloretos dos corpos de prova P-I-15-B2, P-III-15-B2 e P-IV-15-B2, respectivamente. Os corpos de prova deste Bloco II ficaram na cura úmida durante 91 dias.

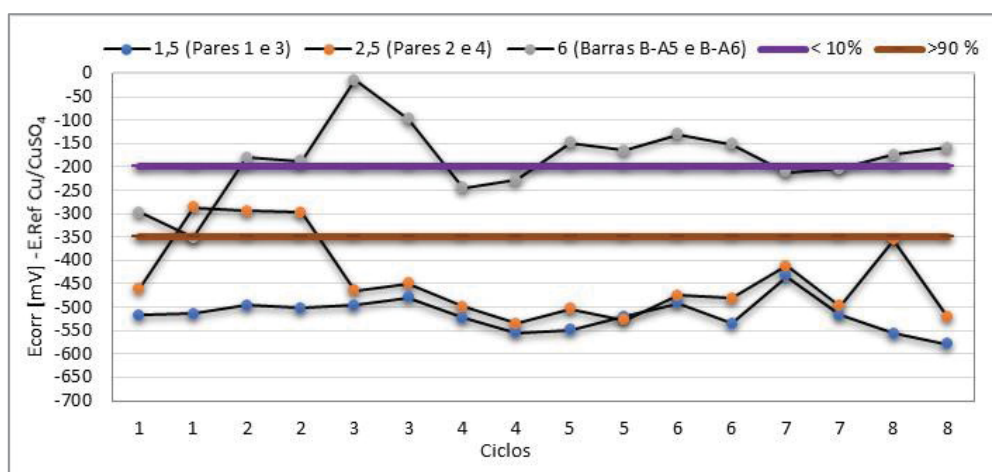
Nos três corpos de prova se observou que os ânodos com o menor cobrimento com relação à superfície exposta à solução aquosa de NaCl (1,5 cm) se mostraram em estado ativo desde o começo do experimento ou logo no ciclo 2 após 8 dias do início do experimento. Quando começou o ciclo 1 os corpos de prova do Bloco II tinham 98 dias de idade e no ciclo 2, 106 dias.

Os ânodos com cobrimento de 2,5 cm passaram ao estado ativo no ciclo 3, 86 dias depois de ter começado o processo de envelhecimento. Nesse momento os corpos tinham a idade de 184 dias.

O potencial de corrosão das barras com 6 cm de profundidade, ficou acima dos -200 mV indicando probabilidade de corrosão menor do que 10% ou na zona de incerteza mostrando valores no intervalo de (-200 a -350 mV), até o final do experimento.

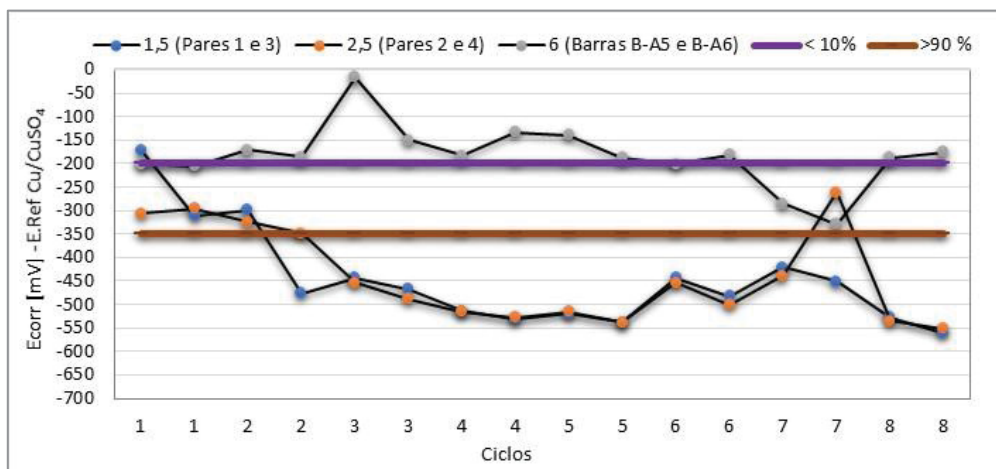
No corpo de prova P-I-15-B2 os valores de E_{corr} dos ânodos do sensor foram estatisticamente equivalentes do ciclo 3 em diante. No corpo de prova P-III-15-B2 foram estatisticamente equivalentes durante todo o experimento e no corpo de prova P-IV-15-B2 em todos os ciclos menos no ciclo 2.

Figura 73: E_{corr} do P-I-15-B2 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).



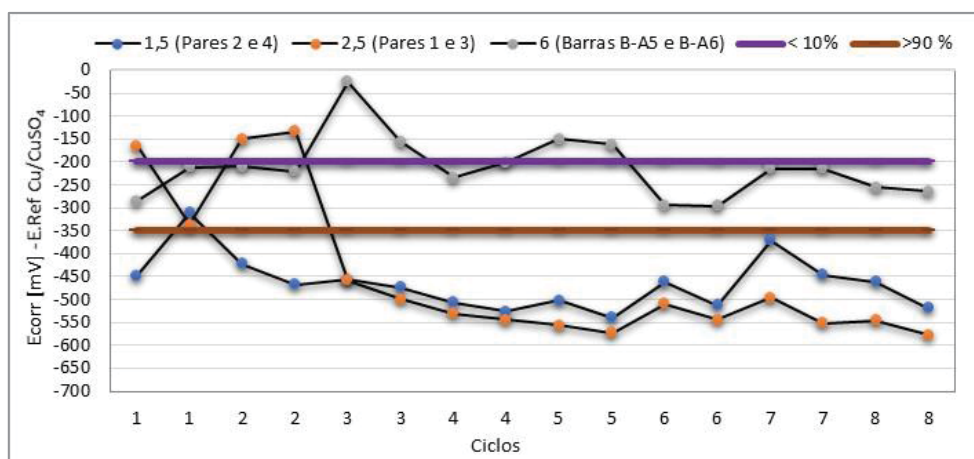
Fonte: Autor (2018)

Figura 74: E_{corr} do P-III-15-B2 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).



Fonte: Autor (2018)

Figura 75: E_{corr} do P-IV-15-B2 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).



Fonte: Autor (2018)

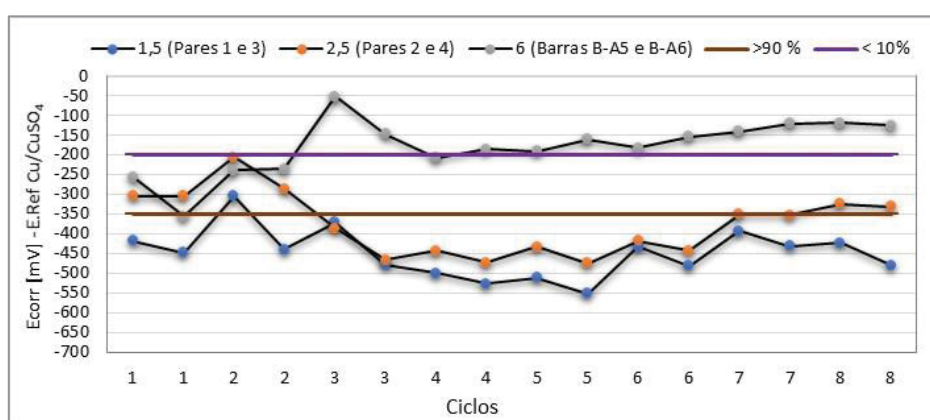
As Figuras 76, 77, 78 e 79 mostram as três curvas de potencial de corrosão correspondentes aos ânodos instalados a 1,5 cm, 2,5 cm e 6 cm, com relação à superfície exposta à penetração de cloretos, dos corpos de prova P-I-30-B2, P-II-30-B2, P-III-30-B2 e P-IV-30-B2, respectivamente. É preciso ressaltar que este corpo de prova a diferença dos anteriormente comentados foi moldado com um traço diferente, com maior teor de cimento e menor relação a/c.

Nas barras com 6 cm de cobrimento, da mesma forma que nos corpos de prova de 15 MPa do Bloco II, a probabilidade de corrosão ficou menor do que 10 % ou no intervalo de (10 a 90) %. Nos ânodos dos sensores instalados a 1,5 cm se observaram valores de potencial de corrosão mais eletronegativos do que -350 mV desde o começo do experimento ou logo no ciclo 2 após 8 dias do início do experimento. Os ânodos com cobrimento de 2,5 cm passaram ao estado ativo

no ciclo 3, 86 dias depois de ter começado o processo de envelhecimento e de forma excepcional no corpo de prova P-III-30-B2 no ciclo 2.

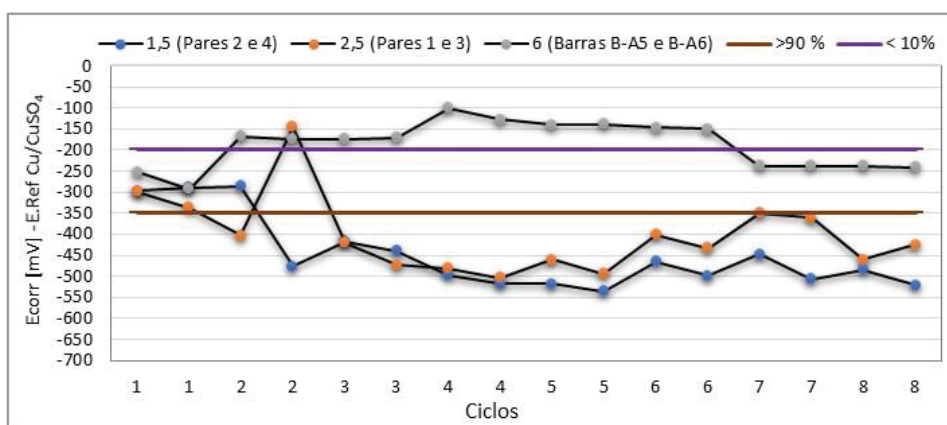
Nos corpos de prova de ambos os traços, durante os dois primeiros ciclos os valores de potencial de corrosão se mostraram instáveis oscilando do estado ativo para o passivo, sobretudo o potencial de corrosão registrados nas barras (6 cm de profundidade). No entanto, segundo a análise estatística os valores de E_{corr} , correspondentes aos seis ânodos do sensor instalado no corpo de prova P-II-30-B2, foram estatisticamente equivalentes nesses ciclos. Nos corpos de prova P-I-30-B2, P-III-30-B2 e P-IV-30-B2 os valores de potencial de corrosão dos ânodos do sensor foram estatisticamente equivalentes do ciclo 4 ao 8.

Figura 76: E_{corr} do P-I-30-B2 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).



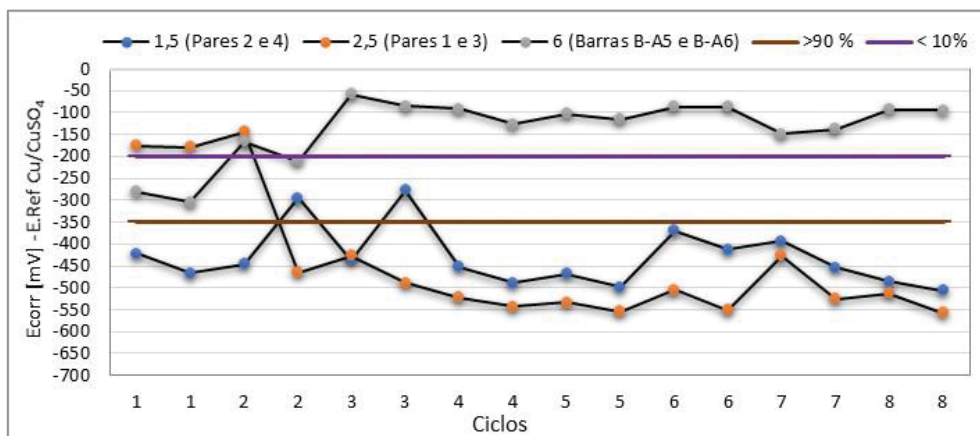
Fonte: Autor (2018)

Figura 77: E_{corr} do P-II-30-B2 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).



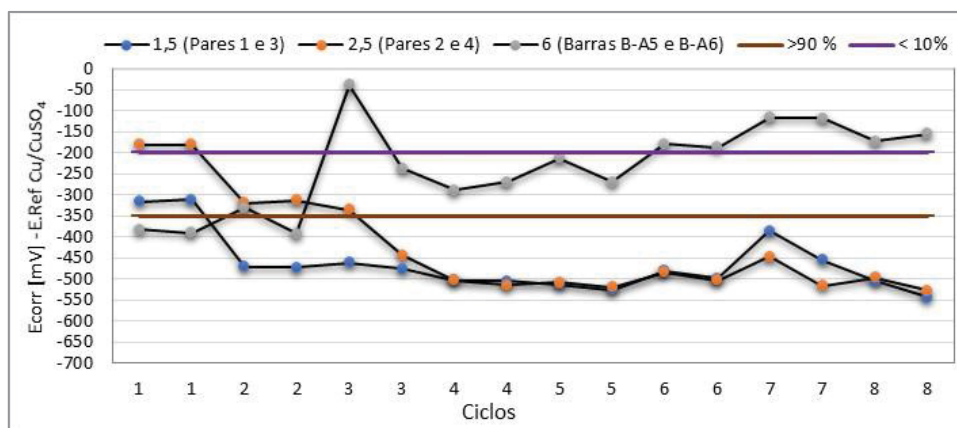
Fonte: Autor (2018)

Figura 78: E_{corr} do P-III-30-B2 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).



Fonte: Autor (2018)

Figura 79: E_{corr} do P-IV-30-B2 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento (cloretos em todos os ciclos).



Fonte: Autor (2018)

Como explicado no programa experimental, cada bloco foi composto por 8 corpos de prova: 4 com 15 MPa e 4 com 30 MPa. Os oito corpos de cada bloco foram ensaiados ao mesmo tempo. Dessa forma, os corpos de prova com 30 MPa do Bloco II também tinham 98 dias de idade quando começou o ciclo 1, 106 dias no ciclo 2 e 184 dias no início do ciclo 3.

4.2.4.3 Comparação do Bloco I com o Bloco II.

A partir da análise dos valores de potencial de corrosão obtidos em ambos os blocos é possível constatar que os ânodos com cobrimento de 1,5 cm com relação à superfície exposta à solução aquosa de NaCl, se mostraram em estado ativo desde o começo do experimento ou logo no ciclo 2.

No Bloco II (91 d) os ânodos com cobrimento de 2,5 cm passaram ao estado ativo no ciclo 3, 86 dias depois de ter começado o processo de envelhecimento.

Nos corpos de prova do Bloco I _(1 d) o potencial de corrosão se comportou de forma semelhante nos quatro ânodos dos sensores galvânicos.

Neste contexto, é necessário apontar que a principal diferença entre o Bloco I _(1 d) e o Bloco II _(91 d) é o tempo que os corpos de prova ficaram na cura úmida. No caso do Bloco I _(1 d) o processo de cura foi interrompido abruptamente após 1 dia de cura. Uma vez que o período de cura programado para cada bloco terminou, os corpos de prova foram colocados em uma estufa a 50 °C. Dessa forma, a cura do Bloco I _(1 d) pode-se considerar insuficiente. Esse fator pode ter condicionado os resultados observados. Por outro lado, nos dois blocos a probabilidade de corrosão ficou menor do que 10 % ou no intervalo de (10 a 90) % nas barras principais com 6 cm de cobrimento.

Um comportamento semelhante foi observado pelos autores Romano, Brito e Rodríguez (2013) os quais estudaram o desempenho de um sensor com eletrodos em profundidades diferentes com relação à superfície exposta do corpo de prova, a saber: 1,5 e 3 cm. Sendo que o eletrodo colocado a menor profundidade indicou despassivação antes do que o eletrodo com 3 cm de cobrimento. Entretanto as barras de reforço do corpo de prova com cobrimento de 4 cm despassivaram 100 dias depois do eletrodo do sensor colocado a maior profundidade.

Nesse estudo as amostras foram expostas a ciclos de molhagem/secagem semanais, nos quais a superfície da amostra no lado do eletrodo de trabalho (WE) foi colocada em uma solução de cloreto (preparada por adição de cloreto de sódio à água da torneira) durante 2 dias e exposta a ar (ambiente de laboratório) durante 5 dias. Processo de envelhecimento semelhante ao adotado nesta pesquisa com a diferença do meio adotado para a secagem já que neste experimento foi usada uma estufa.

Sendo assim, teoricamente valores mais eletronegativos de E_{corr} indicam claramente que um nível crítico de íons cloreto foi atingido no entorno dos ânodos do sensor. Se os ânodos são instalados a diferentes profundidades, os ânodos mais perto da superfície externa, através da qual acontece a penetração dos íons, deverão apresentar valores mais eletronegativos mais rapidamente do que aqueles ânodos localizados a maior profundidade (ROMANO *et al.*, 2013). Neste trabalho os ânodos do sensor galvânico despassivaram mais rápido do que as barras com 6 cm de profundidade.

4.2.5 Potencial dos pares dos sensores instalados nos corpos de prova prismáticos.

As figuras a seguir apresentam os resultados do ensaio de potencial do par galvânico. Após a análise dos resultados do ensaio de potencial do par na primeira etapa do experimento com os sensores imersos em uma solução aquosa, decidiu-se desenvolver esse teste também na segunda etapa. Nesse

momento tinham sido feitos dois ciclos de envelhecimento com o Bloco II. No Bloco I o ensaio de potencial do par foi feito desde o primeiro ciclo do processo de envelhecimento. Este ensaio foi desenvolvido de forma paralela ao ensaio de corrente galvânica.

4.2.5.1 Bloco I – 1 dia de cura úmida

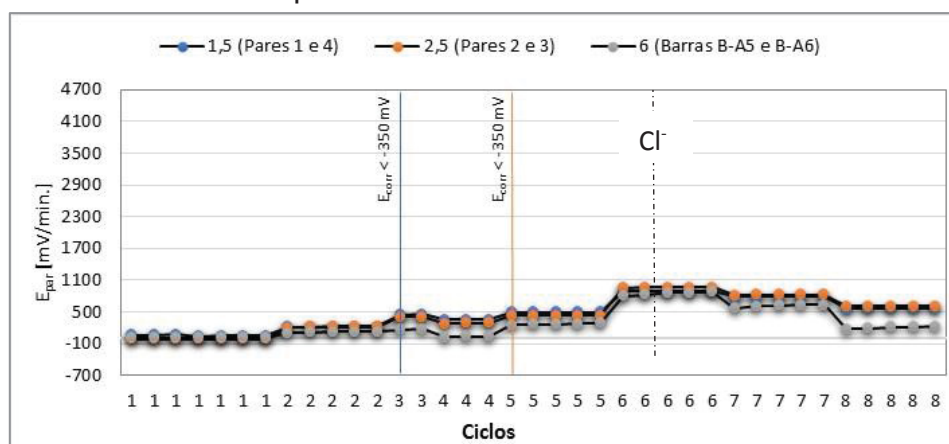
A Figura 80 mostra o gráfico de potencial do par para os seis pares do corpo de prova P-I-15-B1 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento desenvolvidos neste Bloco I. Lembrando que esse corpo de prova só esteve em contato com cloretos no começo do ciclo 6.

Na figura é possível observar que o potencial dos pares colocados a 1,5 cm ficou no intervalo de 0 a 100 mV/min. no ciclo 1, durante o qual o potencial de corrosão foi maior do que -200 mV. No ciclo 2 o potencial dos pares se tornou maior do que 200 mV/min, nesse ciclo o potencial de corrosão diminuiu até ficar na zona de incerteza. Desse ciclo em diante manteve tendência a aumentar mostrando os maiores valores no ciclo 6 quando foi introduzido o cloreto. A partir do ciclo 3, o potencial de corrosão indicou despassivação, conforme mostra a Figura 65.

O potencial dos pares colocados a 2,5 cm foi negativo durante o ciclo 1, o potencial de corrosão dos ânodos nesses pares também foi maior do que -200 mV no ciclo 1. Após a introdução de cloretos no sistema aço-concreto, nos ciclos 7 e 8, os potenciais dos quatro pares do sensor se tornaram equivalente.

O potencial dos pares formados pelas barras e o cátodo se mostrou positivo no ciclo 1, porém, não foi maior do que 20 mV/min. Até o ciclo 5 ficou menor do que 200 mV/min.; durante o ciclo 6 aumentou, mas nos ciclos seguintes mostrou uma tendência a diminuir até valores menores do que 200 mV/min.

Figura 80: Potencial dos pares no corpo de prova P-I-15-B1 o qual ficou exposto a cloretos só no ciclo 6.



Fonte: Autor (2018)

As Figuras 81, 82 e 83 mostram os gráficos de potencial do par para os seis pares dos corpos de prova P-II-15-B1, P-III-15-B1 e P-IV-15-B1, respectivamente. Esses corpos ficaram expostos a cloretos nos oito ciclos de envelhecimento.

Nas Figuras 81 e 82 se observa que nos corpos de prova P-II-15-B1 e P-IV-15-1, o potencial dos pares colocados a 1,5 cm foi positivo e maior do que 200 mV/min. desde o ciclo 1. Entretanto, o potencial dos pares colocados a 2,5 cm se tornou positivo e maior do que 200 mV/min. no ciclo 2.

No corpo de prova P-III-15-B1 o potencial dos pares com 1,5 cm de cobertura se tornou positivo e maior do que 200 mV/min. no ciclo 2. Enquanto, que o potencial dos pares com 2,5 cm de cobertura foi positivo indicando reação galvânica desde o começo do experimento.

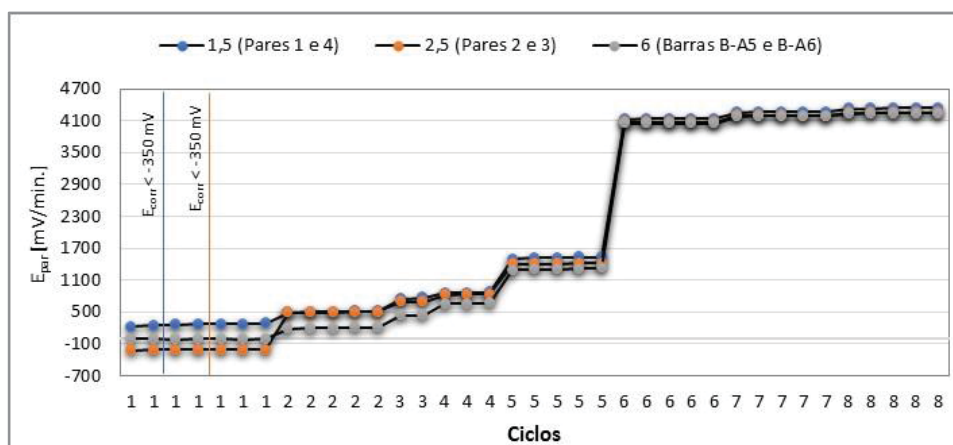
Resumindo, o potencial dos quatro pares dos sensores instalados nos corpos de prova P-II-15-B1, P-III-15-B1 e P-IV-15-B1 ficou acima de 200 mV/min. logo no ciclo 2, indicando uma reação galvânica nos quatro pares dos sensores. A partir daí o potencial dos pares aumentou de forma constante até o fim do experimento.

Porém no corpo de prova P-II-15-B1, o E_{corr} dos ânodos com 2,5 cm de cobertura em lugar de se tornar mais eletronegativo aumentou chegando a ficar inclusive acima de -200 mV no ciclo 5. Sendo assim, ambas grandezas indicam estado ativo nos ânodos com 2,5 cm de cobertura só no ciclo 2. O resultado do teste de E_{corr} nesse corpo de prova é mostrado na Figura 66. Nos dois corpos de prova restantes, P-III-15-B1 e P-IV-15-B1, os resultados de ambos os testes estão em concordância a partir do ciclo 2, nos quatro ânodos dos sensores. Os resultados do teste de E_{corr} nesses corpos de prova se mostram nas Figuras 67 e 68, respectivamente.

Nos três corpos de prova a partir do ciclo 5, o potencial dos pares formados pelas barras (6 cm de cobertura) e o cátodo, se comportou de forma semelhante ao potencial dos pares com 2,5 cm de cobertura dos sensores. Porém, a probabilidade de corrosão nas barras a 6 cm de profundidade foi menor do que 10 % durante todo o experimento.

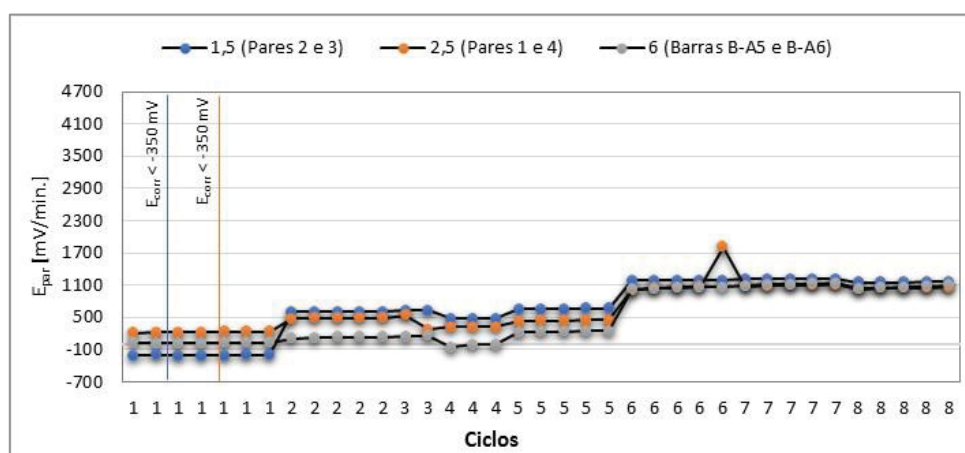
Quando o ânodo está em estado passivo o que predomina é a polarização catódica. Nesse caso o valor de potencial do par é: (i) típico de uma reação eletrolítica (negativo) ou (ii) positivo, porém, não é um valor alto indicando pouca diferença entre o potencial do ânodo e o potencial do cátodo. Pois quanto maior seja a diferença de potencial, mais intensa tende a ser a polarização anódica (PAWLICK *et al.*, 1998, SOUSA, 2014; FERNANDES e MARTENDAL, 2015).

Figura 81: Potencial dos pares no corpo de prova P-II-15-B1 (cloreto nos oito ciclos).



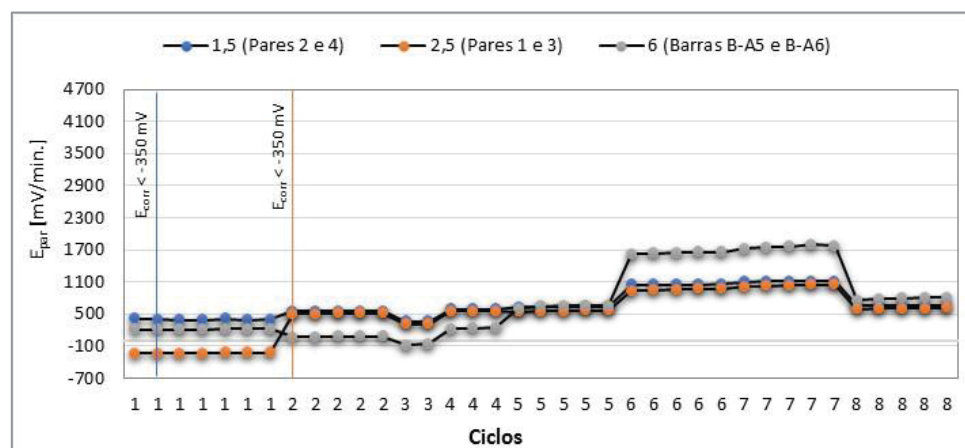
Fonte: Autor (2018)

Figura 82: Potencial dos pares no corpo de prova P-III-15-B1 (cloreto nos oito ciclos).



Fonte: Autor (2018)

Figura 83: Potencial dos pares no corpo de prova P-IV-15-B1 (cloreto nos oito ciclos).



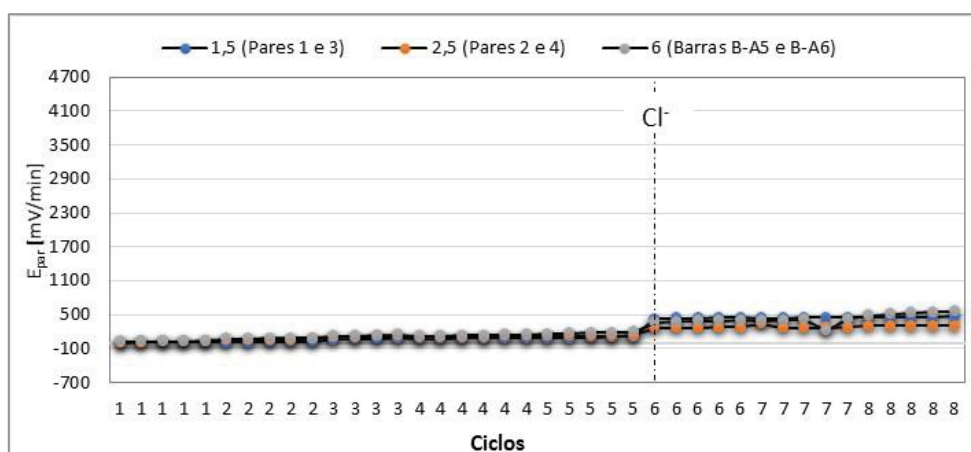
Fonte: Autor (2018)

A Figura 84 mostra o gráfico de potencial do par para os seis pares do corpo de prova P-I-30-B1 ao longo dos oito ciclos de envelhecimento desenvolvidos neste Bloco I. Os potenciais dos quatro pares do sensor foram positivos desde o ciclo 1. Os pares com 1,5 cm de cobrimento ficaram no intervalo de 0 a 100 mV/min. do ciclo 1 até o ciclo 6 quando foi introduzido cloreto no sistema aço-concreto e o potencial destes pares se tornou maior do que 400 mV/min.

No ciclo 6 o potencial de corrosão dos ânodos colocados a 1,5 cm ficou mais eletronegativo do que -200 mV ficando na zona de incerteza conforme mostra a Figura 69. É necessário destacar que o corpo de prova P-I-30-B1 só ficou em contato com cloretos no começo do ciclo 6 da mesma forma que o corpo de prova P-I-15-B1.

Os pares com 2,5 cm e 6 cm de cobrimento também ficaram no intervalo de 0 a 100 mV/min. do ciclo 1 até o ciclo 6 quando o valor de potencial ficou no intervalo de 200 a 400 mV/min. Não obstante, o potencial de corrosão desses ânodos ficou acima de -200 mV durante todo o experimento.

Figura 84: Potencial dos pares no corpo de prova P-I-30-B1, exposto a cloretos só no começo do ciclo 6.



Fonte: Autor (2018)

As Figuras 85, 86 e 87 mostram os gráficos de potencial do par para os seis pares dos corpos de prova P-II-30-B1, P-III-30-B1 e P-IV-30-B1, respectivamente, ao longo dos oito ciclos de envelhecimento desenvolvidos.

Nos três corpos de prova durante o primeiro ciclo o potencial dos pares com 1,5 cm de cobrimento ficou no intervalo de 0 a 200 mV/min., mas logo no ciclo 2 se tornou maior do que 400 mV/min. e aumentou de forma constante até o fim do experimento. Os resultados estão em concordância com os valores obtidos no ensaio de potencial de corrosão que indicaram estado ativo nesses ânodos no fim do ciclo 1 ou logo no ciclo 2, conforme mostram as Figuras 70, 71 e 72.

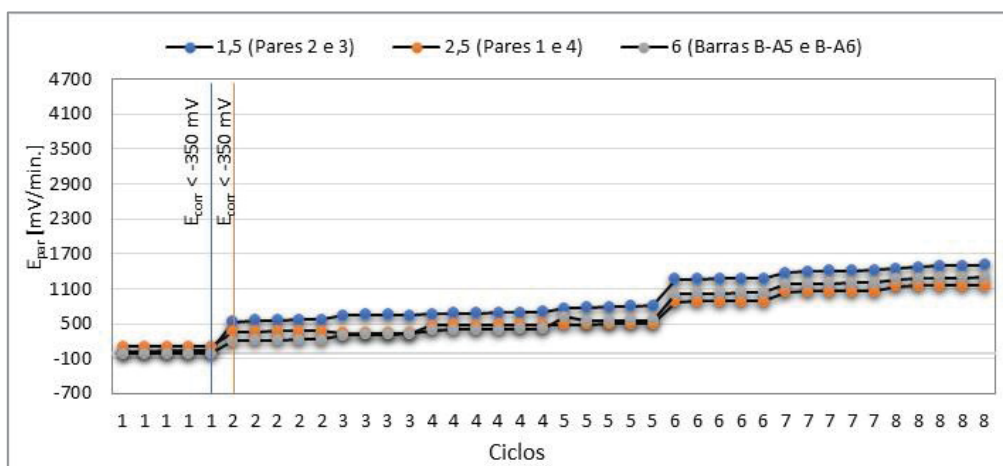
O potencial dos pares colocados a 2,5 cm, nos corpos de prova P-II-30-B1 e P-III-30-B1, ficou no intervalo de 100 a 400 mV/min. do ciclo 1 ao 3. Do ciclo 4 em diante ficou maior do que 400 mV/min. Porém, os valores de E_{corr} correspondentes chegam a ficar na zona de incerteza a partir do ciclo 5.

No corpo de prova P-IV-30-B1 o potencial dos pares colocados a 2,5 cm foi negativo durante o ciclo 1. Do ciclo 2 ao 5 ficou no intervalo de 100 a 400 mV/min. Do ciclo 6 em diante se tornou maior do que 400 mV/min e com tendência a aumentar. O potencial de corrosão desses ânodos se tornou mais eletronegativo do que -350 mV no ciclo 5.

Entretanto, o potencial dos pares formados pelas barras (6 cm de profundidade) e o cátodo se comportou de forma semelhante ao potencial dos pares dos sensores colocados a 2,5 cm. Porém, durante o teste de potencial de corrosão a probabilidade de corrosão nas barras (6 cm de cobrimento) ficou menor do que 10 %.

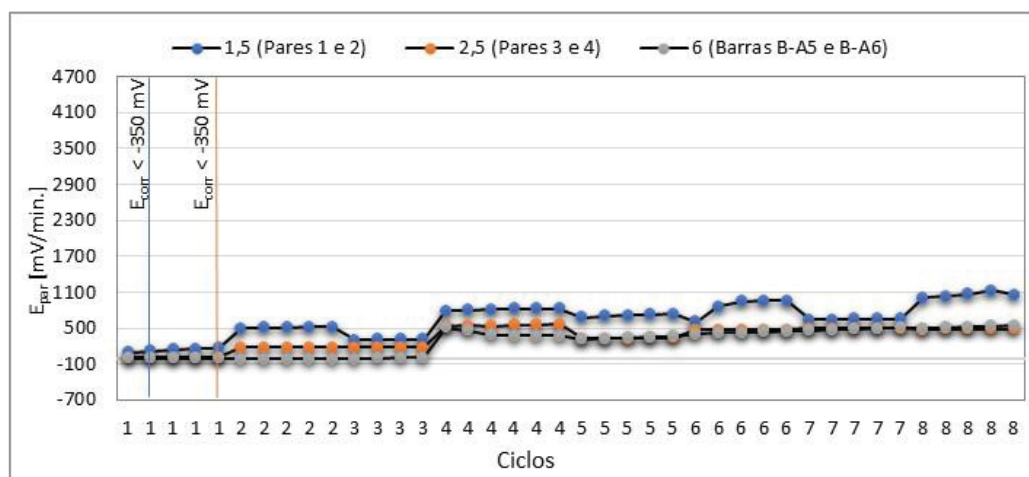
Dessa forma, os resultados obtidos nos pares com 2,5 cm de cobrimento dos sensores e nas barras principais a 6 cm de profundidade durante os testes de E_{corr} e E_{par} , não são coerentes entre si.

Figura 85: Potencial dos pares no corpo de prova P-II-30-B1 (cloreto nos oito ciclos).



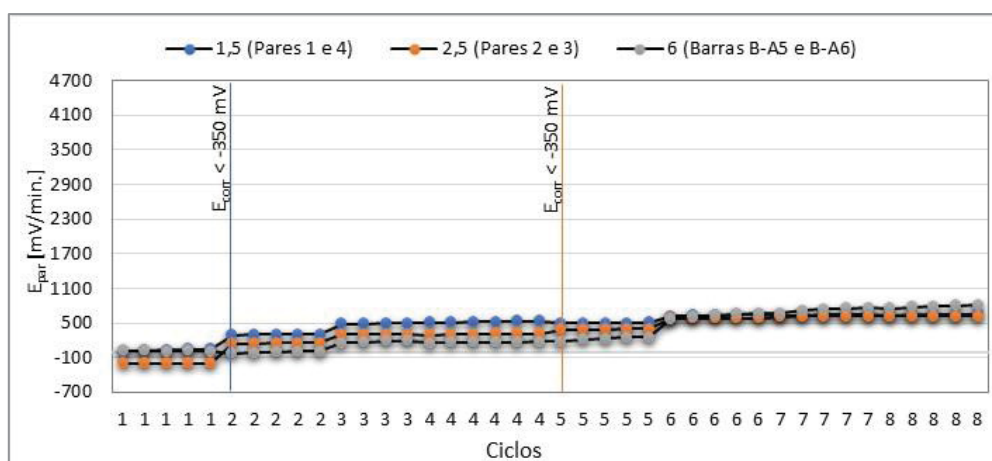
Fonte: Autor (2018)

Figura 86: Potencial dos pares no corpo de prova P-III-30-B1 (cloreto nos oito ciclos).



Fonte: Autor (2018)

Figura 87: Potencial dos pares no corpo de prova P-IV-30-B1 (cloreto nos oito ciclos).



Fonte: Auto (2018)

4.2.5.2 Bloco II – 91 dias de cura úmida

As Figuras 88, 89 e 90 mostram as curvas de potencial do par para os seis pares dos corpos de prova P-I-15-B2, P-III-15-B2 e P-IV-15-B2, respectivamente, ao longo de seis dos oito ciclos de envelhecimento que foram desenvolvidos. Durante os dois primeiros ciclos este ensaio não foi feito com os corpos de prova do Bloco II.

Nos três corpos de prova o potencial dos pares formados entre as barras (6 cm de cobrimento) e o cátodo ficou negativo até o ciclo 6, indicando reação eletrolítica o que significa que as barras (6 cm de cobrimento) ficaram em estado passivo, em concordância com os valores de potencial de corrosão registrados nelas, mostrados nas Figuras 73, 74 e 75.

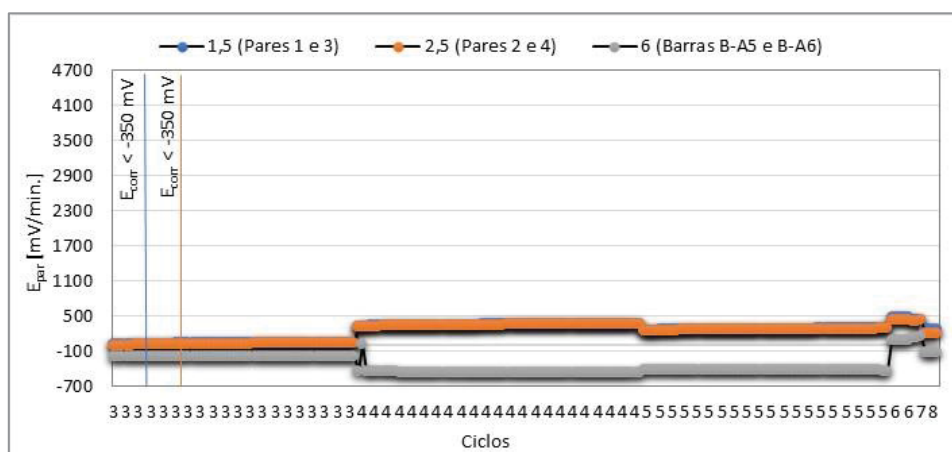
Do ciclo 6 em diante nos corpos de prova P-III-15-B2 e P-IV-15-B2, o valor de E_{par} das barras (6 cm de cobrimento) se tornou definitivamente positivo, porém, menor do que 200 mV/min. Durante esses ciclos o valor de E_{corr} chega a ficar na zona de incerteza. No corpo de prova P-I-15-B2 o valor de E_{par} das barras (6 cm de cobrimento) volta se tornar negativo no ciclo 8. Note-se na Figura 73, que o E_{corr} se recupera nesse ciclo e se mostra maior do que -200 mV novamente.

Nos corpos de prova P-I-15-B2 e P-III-15-B2 o potencial dos quatro pares dos sensores ficou no intervalo de 0 a 100 mV/min no ciclo 3 e a partir do ciclo 4 maior do que 200 mV/min com tendência a aumentar até o fim do experimento; tendo como limite máximo: 550 mV/min.

No corpo de prova P-IV-15-B2 o potencial dos quatro pares do sensor também ficou no intervalo de 0 a 100 mV/min no ciclo 3, porém, no ciclo 4 o potencial dos pares colocados a 2,5 cm virou negativo. A partir do ciclo 5 as curvas de potencial dos quatro pares dos sensores voltaram a se tornar semelhantes, mostrando valores maiores do que 200 mV/min. e tendo como limite máximo 550 mV/min.

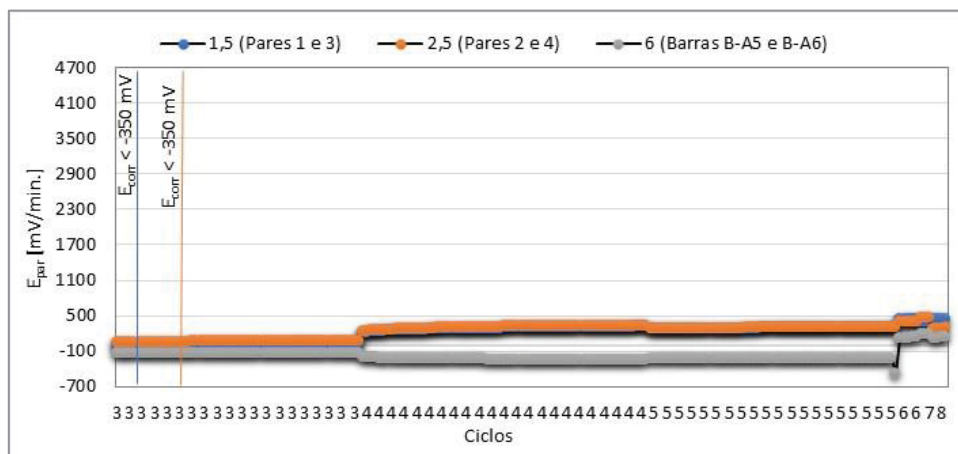
É necessário apontar que os valores de potencial de corrosão nos pares colocados a 2,5 cm se tornaram mais eletronegativos do que -350 mV a partir do ciclo 3. Por tanto, o aumento nos valores de potencial do par, não só acompanhou a transição dos ânodos com 2,5 cm de cobrimento do estado passivo para o ativo como também o crescimento da eletronegatividade do potencial de corrosão dos eletrodos com 1,5 cm de cobrimento. Sobretudo nos corpos de prova P-I-15-B2 e P-III-15-B2.

Figura 88: Potencial dos pares no corpo de prova P-I-15-B2 (cloreto nos oito ciclos).



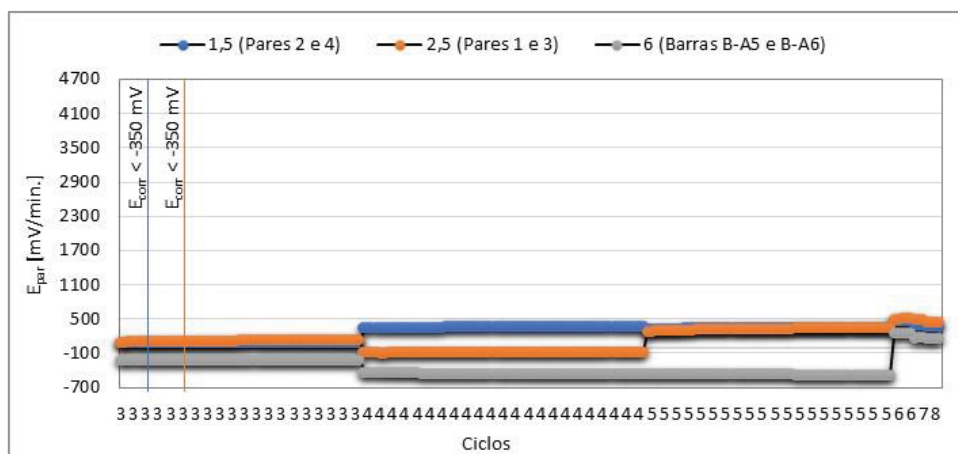
Fonte: Autor (2018)

Figura 89: Potencial dos pares no corpo de prova P-III-15-B2 (cloreto nos oito ciclos).



Fonte: Autor (2018)

Figura 90: Potencial dos pares no corpo de prova P-IV-15-B2 (cloreto nos oito ciclos).



Fonte: Autor (2018)

As Figuras 91, 92, 93 e 94 mostram as curvas de potencial do par para os seis pares dos corpos de prova P-I-30-B2, P-II-30-B2, P-III-30-B2 e P-IV-30-B2 ao longo de seis dos oito ciclos de envelhecimento que foram desenvolvidos neste Bloco II.

No corpo de prova P-I-30-B2, durante o ciclo 3 o potencial dos quatro pares do sensor se mostrou instável, mas oscilou na faixa dos valores positivos, mostrando valores de E_{par} maiores do que 400 mV/min. inclusive. Do ciclo 4 ao 6, ficou no intervalo de 20 a 200 mV/min. A partir do ciclo 6 se tornou maior do que 200 mV/min. e manteve tendência a aumentar no resto do experimento.

Nos corpos de prova P-II-30-B2, P-III-30-B2, e P-IV-30-B2 o E_{par} dos quatro pares dos sensores se tornou maior do que 200 mV/min. no ciclo 3 ou logo no ciclo 4. Nos quatro corpos de prova o E_{par} dos pares dos sensores

manteve tendência a aumentar no resto do experimento após ter atingido 200 mV/min.

O E_{corr} dos ânodos com 1,5 cm de cobrimento, se tornou mais eletronegativo do que -350 mV desde o começo do experimento ou logo no ciclo 2, nos quatro corpos de prova. Sendo assim, e usando o valor de 200 mV/min. como ponto limite, os resultados obtidos em ambos testes não estão em concordância, nos corpos de prova P-I-30-B2 e P-II-30-B2 já que nesse último o E_{par} atingiu 200 mV/min. no ciclo 4.

Nos corpos de prova P-I-30-B2, P-II-30-B2 e P-IV-30-B2, o E_{corr} dos ânodos com cobrimento de 2,5 cm se tornou mais eletronegativo do que -350 mV no ciclo 3. Sendo assim, os resultados dos testes E_{corr} e E_{par} estão em concordância nos corpos de prova P-II-30-B2 e P-IV-30-B2, mas não estão no corpo de prova P-I-30-B2, pois o E_{par} dos quatro pares do sensor só atingiu valores maiores do que 200 mV/min no ciclo 6.

No corpo de prova P-III-30-B2 o E_{corr} dos ânodos com 2,5 cm de cobrimento indicou despassivação no ciclo 2, portanto, é coerente que o E_{par} tenha indicado intensidade anódica alta desde o ciclo 3.

Enquanto isso, nos corpos de prova P-I-30-B2, P-III-30-B2 e P-IV-30-B2, o potencial dos pares formados pelas barras (6 cm de cobrimento) e o cátodo ficou negativo ou no intervalo de -5 a 20 mV/min. durante todo o experimento, indicando reação eletrolítica (E_{par} negativo) ou polarização anódica de pouca intensidade.

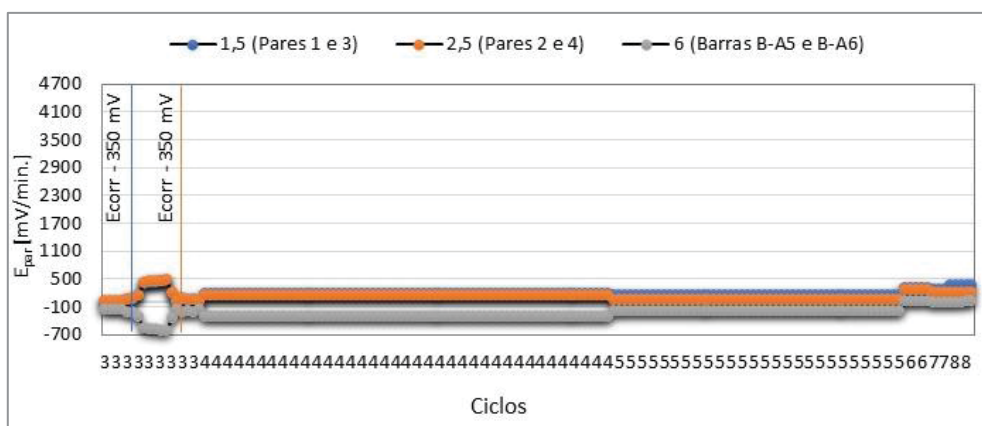
No corpo de prova P-II-30-B2, o E_{par} das barras (6 cm de cobrimento) se comportou dessa forma até o ciclo 6 quando aumentou e mostrou valores no intervalo de 20 a 100 mV/min. No ciclo 7 se tornou maior do que 100 mV/min. e continuo aumentando no resto do experimento. Esses resultados estão em concordância com valores de E_{corr} mostrados na Figura 77, através dos quais é possível constatar que a probabilidade de corrosão nas barras (6 cm de cobrimento) ficou menor do que 10 % até o ciclo 7, a partir do qual passou para a zona de incerteza definitivamente.

Entretanto, nos corpos de prova P-I-30-B2, P-III-30-B2 e P-IV-30-B2, a probabilidade de corrosão nas barras (6 cm de cobrimento) foi predominantemente menor do que 10 % durante todo o experimento. Dessa forma, os resultados de ambos os testes estão em concordância. Os valores de potencial de corrosão são mostrados nas Figura 76, 78 e 79.

Com base nos resultados observados, a partir de 200 mV/min. o E_{par} aumentou durante o resto do experimento provocando um ponto de inflexão nas curvas de E_{par} , tanto nos pares com 1,5 cm como nos pares com 2,5 cm de cobrimento. Dessa forma, esse valor marca o ponto a partir do qual o E_{par} não só

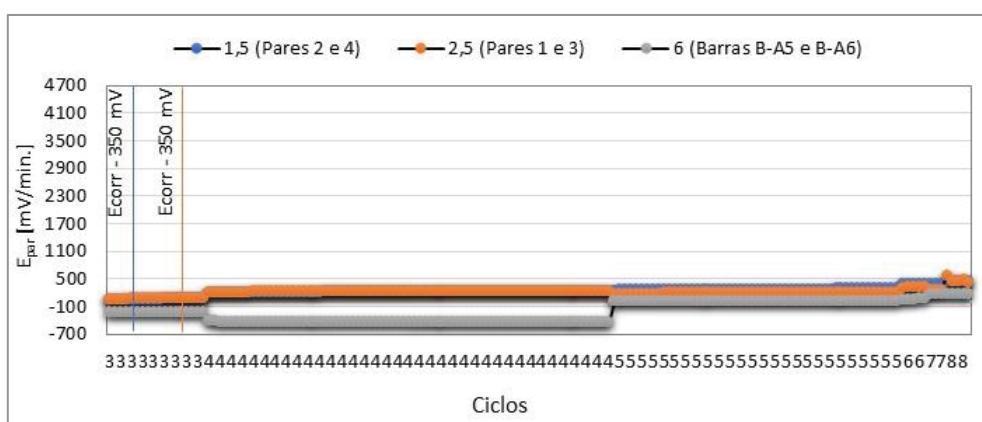
caracteriza como galvânica a reação no par senão também indica que a polarização galvânica está se intensificando de forma constante.

Figura 91: Potencial dos pares no corpo de prova P-I-30-B2 (cloreto nos oito ciclos).



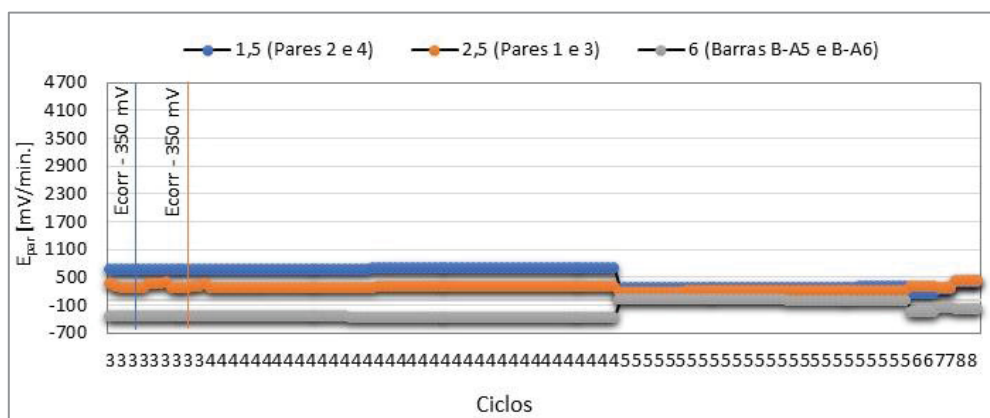
Fonte: Autor (2018)

Figura 92: Potencial dos pares no corpo de prova P-II-30-B2 (cloreto nos oito ciclos).



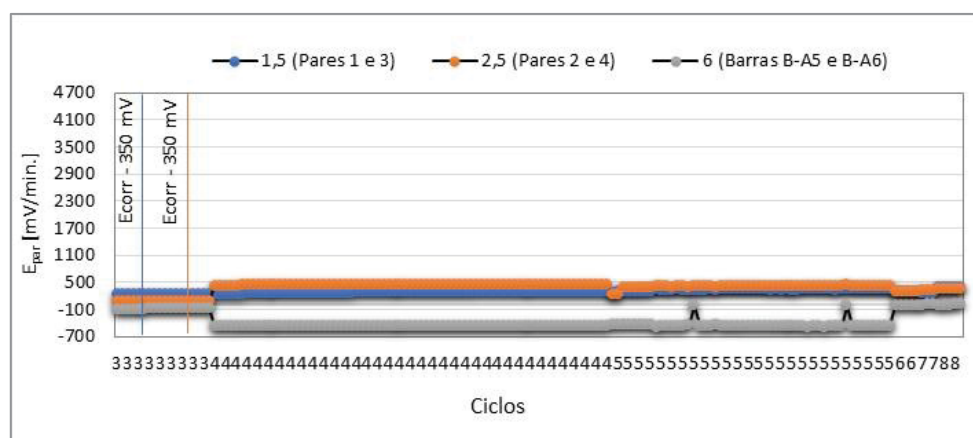
Fonte: Autor (2018)

Figura 93: Potencial dos pares no corpo de prova P-III-30-B2 (cloreto nos oito ciclos).



Fonte: Autor (2018)

Figura 94: Potencial dos pares no corpo de prova P-IV-30-B2 (cloreto nos oito ciclos).



Fonte: Autor (2018)

4.2.5.3 Comparação entre o Bloco I e o Bloco II.

No Bloco II, quando o potencial do par ficou maior do que 200 mV/min., os ânodos estavam definitivamente no estado ativo independentemente do cobrimento. No Bloco I o valor que parece separar o estado passivo do ativo é 400 mV/min.

Os valores de E_{par} são resultado da diferença entre o potencial positivo correspondente ao cátodo e o potencial negativo correspondente ao ânodo, conforme a Equação 3, como resultado do processo de polarização. Se E_{par} é positivo, predomina a polarização anódica: o processo de oxidação predomina sobre o processo de redução e o ânodo está predisposto a sofrer corrosão. Assim, a densidade de corrente total (i) que circula no eletrodo será positiva, conforme a Equação 4. Quanto maior seja a diferença de potencial (E_{par}), mais

intensa tende a ser a polarização (PAWLICK *et al.*, 1998, SOUSA, 2014; FERNANDES e MARTENDAL, 2015).

Dessa forma, para fins de projeto de um sensor galvânico a polarização anódica do par se torna um objetivo fundamental, já que para conseguir monitorar a corrosão é necessário que a reação entre os metais no sensor seja ativa, ainda que nenhum agente agressivo esteja presente no sistema. Assim, quando o teor de íons cloretos atingir o nível crítico, por exemplo, o E_{par} deve passar a aumentar de forma constante indicando que o processo de corrosão é ativo.

Sendo a estabilidade do potencial do par dependente do meio ambiente específico do concreto (PAWLICK *et al.*, 1998), em estudos posteriores é preciso acompanhar o comportamento do potencial do par e do potencial de corrosão em um meio livre de agentes agressivos até que o potencial do sensor se estabilize em um valor positivo, porém, menor do que 20 mV/min. baseado nos resultados observados neste trabalho.

Por outro lado, os valores de potencial do par registrados nos corpos de prova do Bloco I adoptaram valores acima dos 200 mV/min. rapidamente e tendência a aumentar ao longo do experimento, o que nem sempre esteve em concordância com os valores de potencial de corrosão sobretudo aqueles valores referentes às barras com 6 cm de cobrimento. De forma geral, os valores de potencial do par no Bloco I foram maiores do que os observados no Bloco II. Esse comportamento pode ser resultado do menor tempo de cura no Bloco I o que pode ter prejudicado a estabilidade da camada passiva das barras de aço-carbono no interior dos corpos de prova.

4.2.6 Teste de corrente galvânica

4.2.6.1 Bloco I – 1 dia de cura úmida

A Figura 95 mostra o gráfico de corrente galvânica para os seis ânodos do corpo de prova P-I-15-B1 durante os oito ciclos de envelhecimento. A corrente galvânica dos quatro ânodos do sensor ficou oscilando entre valores negativos e positivos, perto de zero, até o ciclo 5 quando ficou positiva até o fim do experimento. Nas barras (6 cm de cobrimento) a corrente ficou oscilando entre valores positivos e negativos durante todo o teste. Os maiores valores de I_{gal} são observados no ciclo 6 quando foi introduzido cloretos no sistema aço-concreto.

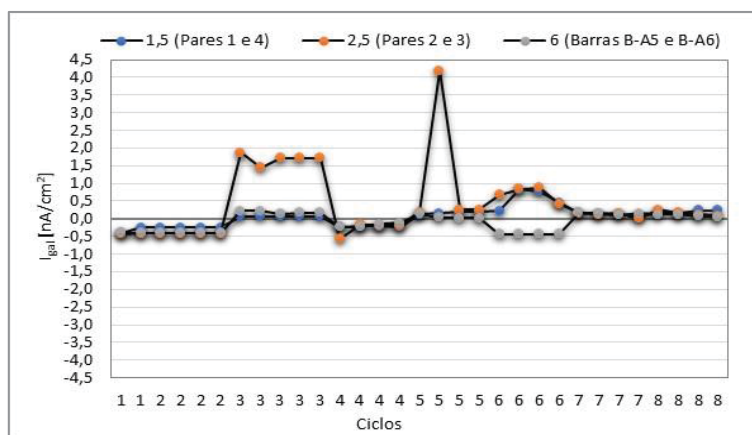
No ciclo 5, o E_{corr} dos ânodos foi mais eletronegativo do que -350 mV, segundo a Figura 65. Sendo assim, a partir do ciclo 5 os resultados dos testes E_{par} , E_{corr} e I_{gal} estão em concordância. Porém, durante os primeiros quatro ciclos do teste a I_{gal} nem sempre indicou polarização anódica.

De fato, o registro dessa corrente não é fácil, já que vai decaindo ao longo da medição, demonstrando um comportamento capacitivo (RIBEIRO e CUNHA,

2014) e valores negativos de corrente galvânica indicam polarização catódica no par o que significa que o aço carbono está atuando como um cátodo, enquanto o metal mais nobre está agindo como ânodo e o aço está em estado passivo (PARK *et al.*, 2005; SOUSA, 2014).

Por outro lado, valores positivos de corrente galvânica, como os observados a partir do ciclo 5, indicam que o potencial do aço é inferior ao do metal mais nobre predominando a polarização anódica o que é indicativo da condição ativa do aço (PARK *et al.*, 2005; SOUSA, 2014).

Figura 95: I_{gal} do P-I-15-B1 nos oito ciclos de envelhecimento.

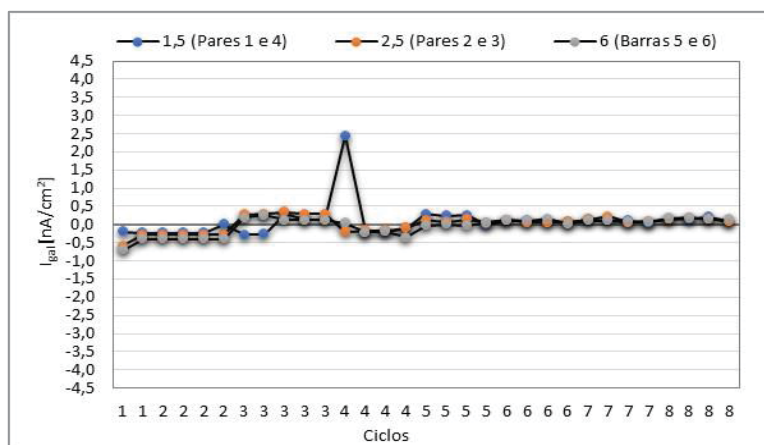


Fonte: Autor (2018)

As Figuras 96, 97 e 98 mostram os gráficos de I_{gal} para os seis ânodos dos corpos de prova P-II-15-B1, P-III-15-B1 e P-IV-15-B1, respectivamente. Nos três corpos de prova, a corrente galvânica dos quatro ânodos do sensor ficou oscilando entre valores negativos e positivos, até o ciclo 5 quando ficou positiva até o fim do experimento. No corpo de prova P-II-15-B1, a I_{gal} das barras (6 cm de cobertura) só se tornou definitivamente positiva a partir do ciclo 6. No corpo de prova P-III-15-B1, a partir do ciclo 5 e no corpo de prova P-IV-15-B1 no ciclo 7. Durante todo o experimento os valores de I_{gal} ficaram perto de zero.

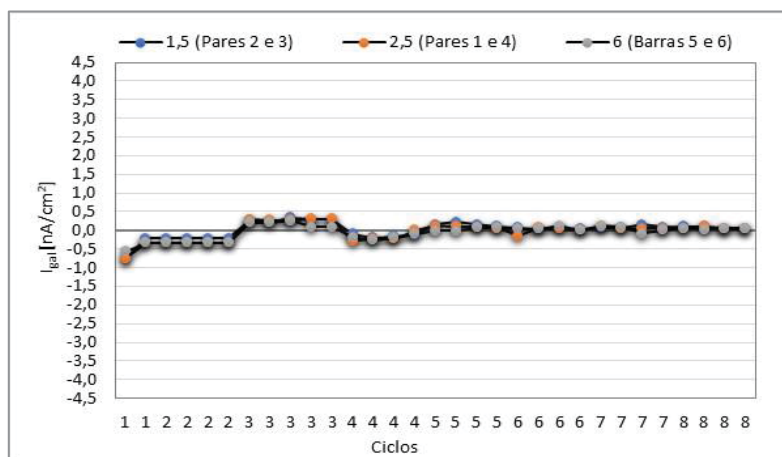
Nos três corpos de prova, durante o ciclo 5 o E_{par} dos quatro pares do sensor já era maior do que 200 mV/min. e os ânodos do sensor estavam em estado ativo. Entretanto, o E_{corr} das barras ficou acima de -200 mV durante todo o experimento nos três corpos de prova. Os resultados de E_{corr} e E_{par} no corpo de prova P-II-15-B1 são mostrados nas Figuras 66 e 81; os do corpo de prova P-III-15-B1 nas Figuras 67 e 82 e os do corpo de prova P-IV-15-B1 nas Figuras 68 e 83, respectivamente.

Figura 96: I_{gal} do P-II-15-B1 nos oito ciclos de envelhecimento.



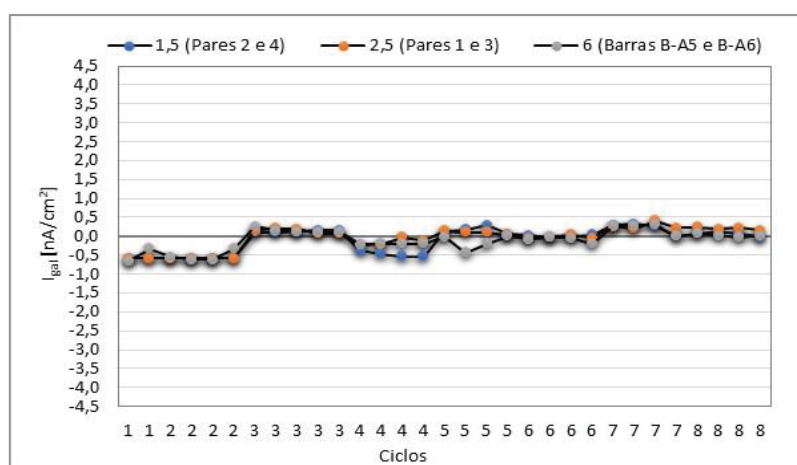
Fonte: Autor (2018)

Figura 97: I_{gal} do P-III-15-B1 nos oito ciclos de envelhecimento.



Fonte: Autor (2018)

Figura 98: I_{gal} do P-IV-15-B1 nos oito ciclos de envelhecimento.



Fonte: Autor (2018)

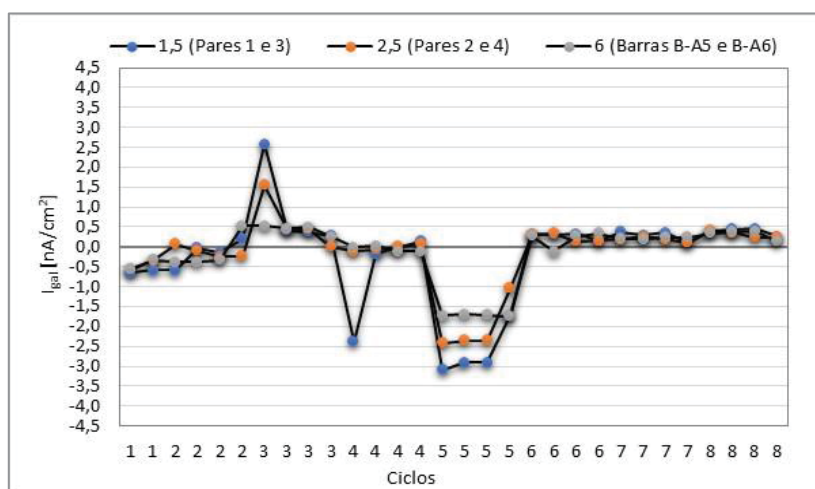
Teoricamente, quando um processo corrosivo é estabelecido nas barras a corrente galvânica apresenta um valor significativo em decorrência da variação do potencial do ânodo, que assume valores mais negativos em relação aos obtidos inicialmente, em seu estado passivo (ARAÚJO *et al.*, 2013; LACERDA e MULLER, 2015). E um aumento da corrente galvânica, acompanhado por uma diminuição do potencial de circuito aberto, indica que um nível crítico de íons cloreto foi atingido (ANDRADE *et al.*, 2008; ARAÚJO *et al.*, 2013).

Analisando os resultados obtidos com os sensores nos três testes é possível constatar que quando o E_{par} dos pares já era maior do que 200 mV/min., e o E_{corr} era mais eletronegativo do que -350 mV: a corrente foi positiva. Porém, a corrente galvânica ficou perto de zero durante todo o teste. Sendo assim, da mesma forma que o acontecido na primeira etapa do programa experimental com os sensores embebidos em uma solução aquosa, a I_{gal} mostrou maior inércia para identificar a presença de um agente agressivo. Valores de corrente galvânica perto de zero também são indicativos da condição passiva do aço (PARK *et al.*, 2005; SOUSA, 2014).

A Figura 99 mostra os resultados de corrente galvânica registrados nos seis ânodos do corpo de prova P-I-30-B1. A corrente galvânica dos seis ânodos ficou oscilando entre valores positivos e negativos até o ciclo 6 no qual se tornou positiva, mas ainda ficou perto de zero. É necessário apontar que foi no começo do ciclo 6 que foi introduzido cloreto no sistema aço-concreto deste corpo de prova P-I-30-B1.

O potencial dos seis pares do sensor se tornou maior do que 200 mV/min. no ciclo 6 conforme mostra a Figura 102. Apesar dos ânodos com 2,5 cm e 6 cm de cobertura não terem chegado a apresentar valores de E_{corr} mais eletronegativos do que -200 mV. como evidenciado na Figura 69. Sendo assim, os resultados obtidos nos três testes não são coerentes entre si.

Figura 99: I_{gal} do P-I-30-B1 nos oito ciclos de envelhecimento.



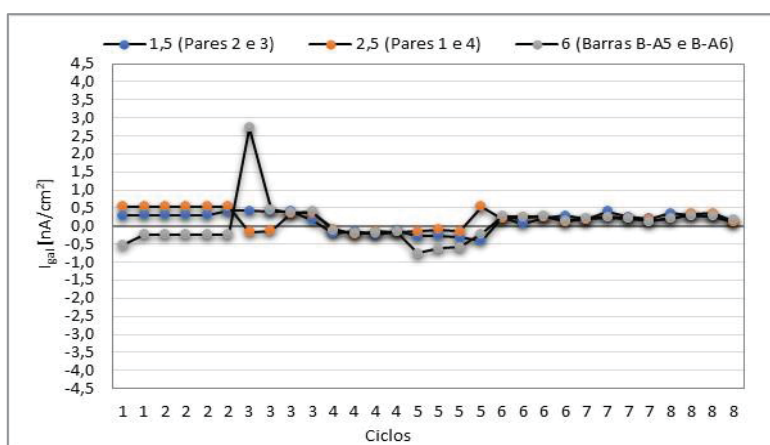
Fonte: Autor (2018)

As Figuras 100, 101 e 102 mostram as curvas de corrente galvânica dos seis ânodos nos corpos de prova P-II-30-B1, P-III-30-B1 e P-IV-30-B1, respectivamente. A corrente galvânica dos seis ânodos ficou oscilando entre valores positivos e negativos até o ciclo 5 ou 6 no qual se tornou definitivamente positiva, de forma semelhante ao observado nos corpos de prova do traço 15 MPa.

O E_{par} das barras (6 cm de cobrimento) mostrou valores semelhantes aos valores positivos e maiores do que 200 mV/min. registrados nos pares a 2,5 cm. Apesar de tudo, o E_{corr} obtidos nas barras (6 cm de cobrimento) ficou acima de -200 mV. Entretanto, desde o ciclo 1 os valores E_{par} e E_{corr} nos quatro ânodos do sensor indicaram o predomínio da polarização anódica.

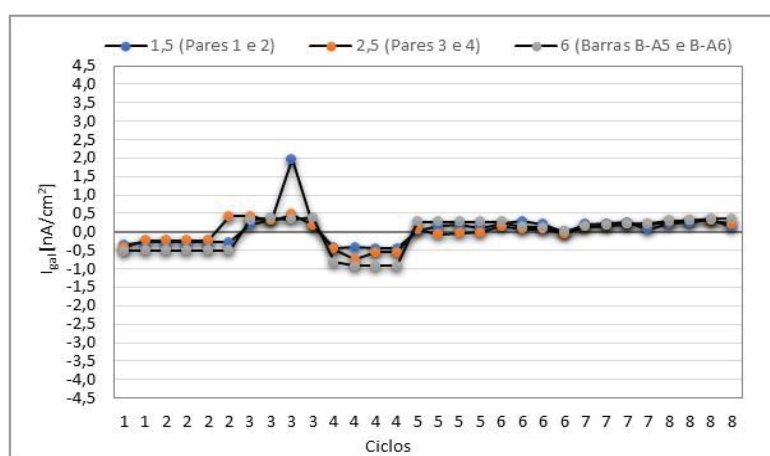
No corpo de prova P-II-30-B1, os resultados dos testes de E_{corr} e E_{par} encontram-se nas Figuras 70 e 85; no corpo de prova P-III-30-B1 nas Figuras 71 e 86 e no corpo de prova P-IV-30-B1 nas Figuras 72 e 87, respectivamente.

Figura 100: I_{gal} do P-II-30-B1 nos oito ciclos de envelhecimento.



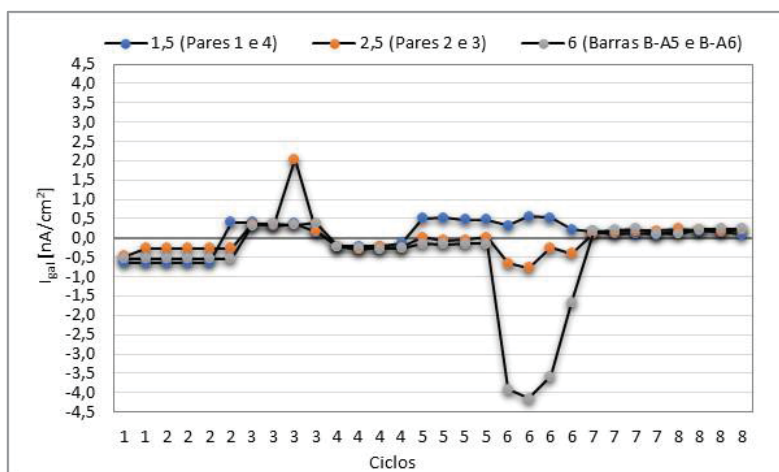
Fonte: Autor (2018)

Figura 101: I_{gal} do P-III-30-B1 nos oito ciclos de envelhecimento.



Fonte: Autor (2018)

Figura 102: I_{gal} do P-IV-30-B1 nos oito ciclos de envelhecimento.



Fonte: Autor (2018)

4.2.6.2 Bloco II – 91 dia de cura úmida

As Figura 103, 104 e 105 mostram os valores de corrente galvânica obtidos nos seis ânodos dos corpos de prova P-I-15-B2, P-III-15-B2 e P-IV-15-B2. No corpo de prova P-I-15-B2, a I_{gal} dos seis ânodos ficou oscilando entre valores positivos e negativos ao longo de todo o teste.

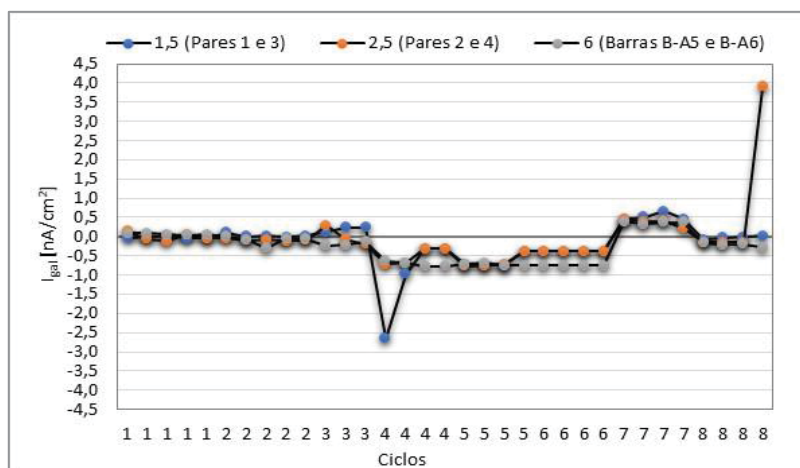
Nos corpos de prova P-III-15-B2 e P-IV-15-B2, a I_{gal} dos seis ânodos ficou negativa durante sete dos oito ciclos que foram desenvolvidos. Nos três corpos de prova os maiores valores foram registrados no ciclo 7, porém, perto de zero.

Os resultados obtidos nos testes de E_{par} e E_{corr} indicam a presença de íons cloretos perto da superfície dos ânodos do sensor no teor suficiente como desestabilizar a camada passiva, tornar o potencial de corrosão mais eletronegativo e o potencial do par típico de uma reação galvânica. Não entanto, os valores a corrente galvânica não identificaram a presença de íons cloretos.

De forma distinta, o E_{par} nas barras, indicou uma reação eletrolítica o que significa que as barras ficaram em estado passivo em concordância com o valor de potencial de corrosão medido nas barras e por tanto com os valores de corrente galvânica.

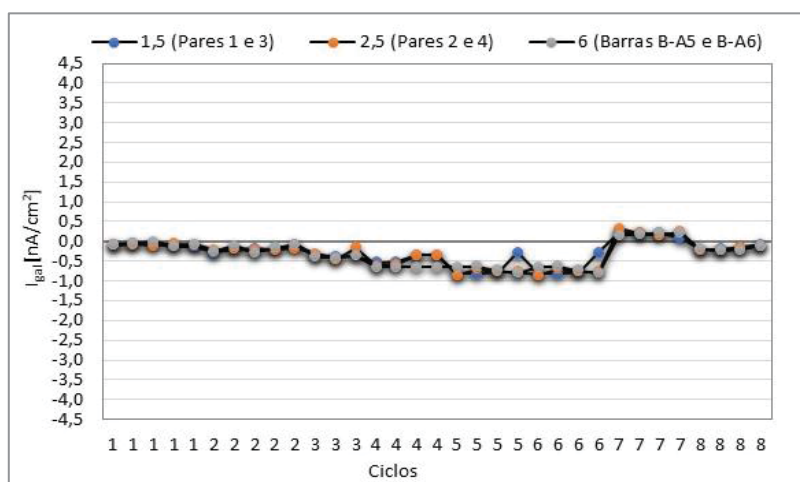
No corpo de prova P-I-15-B2, os resultados dos testes de E_{corr} e E_{par} encontram-se nas Figuras 73 e 88; no corpo de prova P-III-15-B2 nas Figuras 74 e 89 e no corpo de prova P-IV-15-B2 nas Figuras 75 e 90, respectivamente.

Figura 103: I_{gal} do P-I-15-B2 nos oito ciclos de envelhecimento.



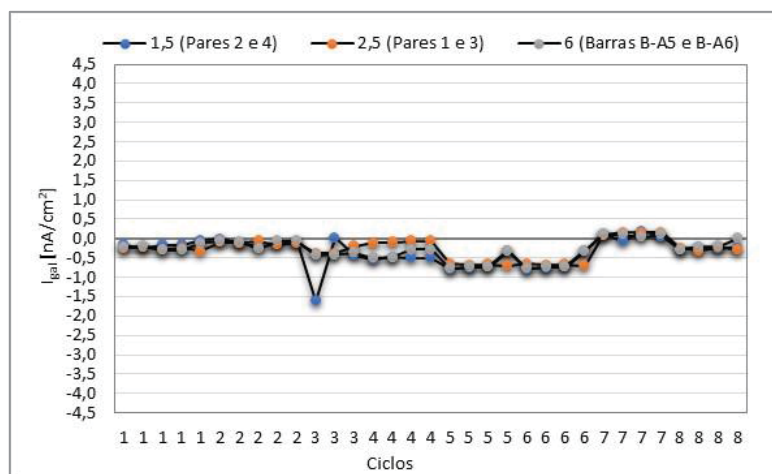
Fonte: Autor (2018)

Figura 104: I_{gal} do P-III-15-B2 nos oito ciclos de envelhecimento.



Fonte: Autor (2018)

Figura 105: I_{gal} do P-IV-15-B2 nos oito ciclos de envelhecimento.



Fonte: Autor (2018)

As Figuras 106 a 109 mostram os gráficos de corrente galvânica para os seis ânodos dos corpos de prova do traço 30 MPa durante os oito ciclos de envelhecimento. Da mesma forma que nos corpos de prova do traço 15 MPa a corrente galvânica registrada nos quatro corpos de prova do traço 30 MPa ficou negativa durante sete dos oito ciclos que foram desenvolvidos. Sendo assim, a corrente galvânica não identificou a presença de cloretos na interface aço – concreto.

Na Figura 106 é possível observar que a corrente galvânica, dos seis ânodos no corpo de prova P-I-30-B2, ficou positiva no ciclo 8. No corpo de prova P-II-30-B2, a I_{gal} ficou oscilando entre valores positivos e negativos no ciclo 8, como mostra a Figura 107.

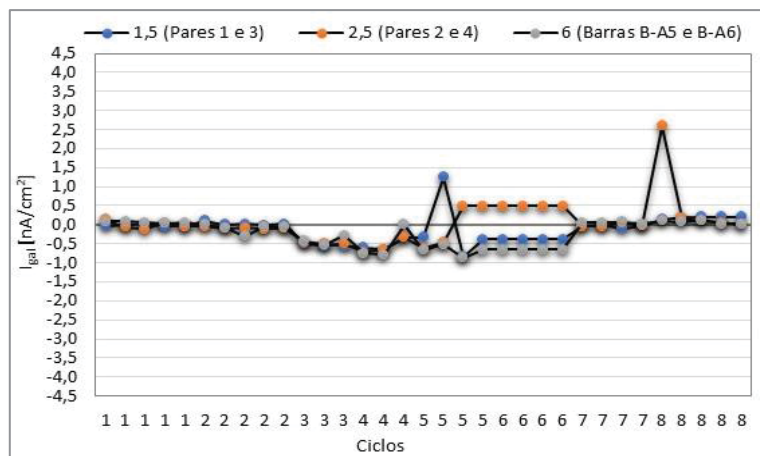
Na Figura 108 observa-se que a corrente galvânica, dos ânodos com 1,5 cm de cobrimento e das barras no corpo de prova P-III-30-B2, ficou positiva no ciclo 7 e a corrente galvânica dos ânodos com 2,5 cm de cobrimento oscilou entre valores positivos e negativos. No corpo de prova P-IV-30-B2 a I_{gal} ficou positiva no ciclo 7, como mostra a Figura 109.

Entretanto, nas Figuras 91 a 94 se observa que o potencial dos quatro pares de cada um dos sensores resultou ser positivo desde o ciclo 3, indicando uma reação galvânica nos quatro pares desde o começo do teste de forma semelhante ao observado nos corpos de prova de 15 MPa do mesmo Bloco II.

Além disso, nas Figuras 76 a 79 pode-se constatar que os ânodos dos sensores, se mostraram em estado ativo rapidamente, pelo que os resultados obtidos nos testes, E_{par} e E_{corr} , estão em concordância.

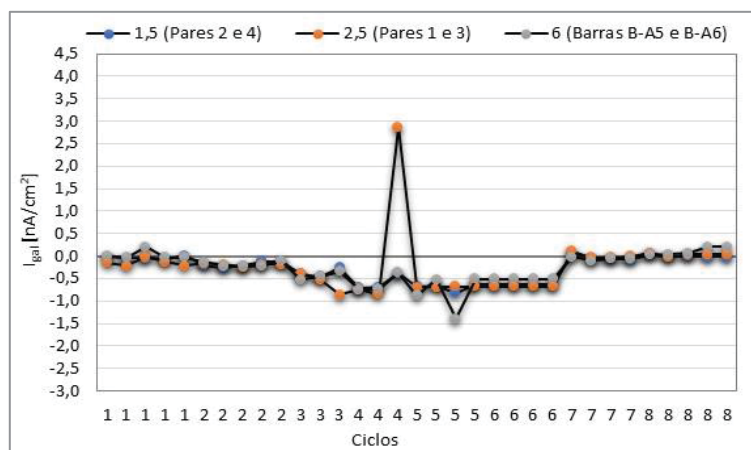
Nas barras com 6 cm de cobrimento, o E_{par} ficou negativo do ciclo 3 ao 4. A partir do ciclo 5 ou 6 ficou no intervalo de -5 a 20 mV/min até o fim do experimento. Resultados que estão em concordância com uma probabilidade de corrosão menor do que 10 % com base no observado ao longo do experimento.

Figura 106: I_{gal} do P-I-30-B2 nos oito ciclos de envelhecimento.



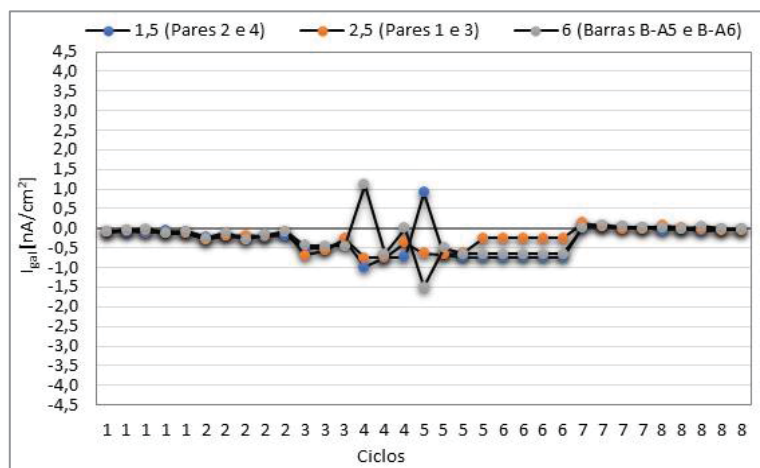
Fonte: Autor (2018)

Figura 107: I_{gal} do P-II-30-B2 nos oito ciclos de envelhecimento.



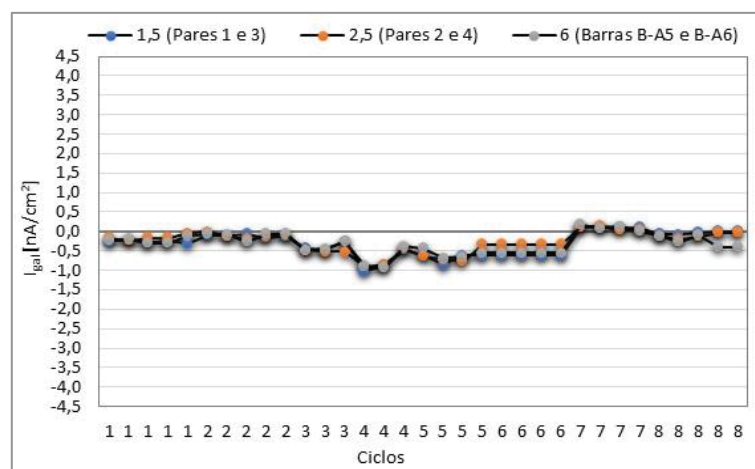
Fonte: Autor (2018)

Figura 108: I_{gal} do P-III-30-B2 nos oito ciclos de envelhecimento.



Fonte: Autor (2018)

Figura 109: I_{gal} do P-IV-30-B2 nos oito ciclos de envelhecimento.



Fonte: Autor (2018)

4.2.6.3 Comparação entre Bloco I e Bloco II.

A corrente galvânica registrada nos ânodos dos corpos de prova do Bloco II foi menor do que aquela registrada nos ânodos dos corpos de prova do Bloco I. A única diferença entre os blocos é o tempo que os corpos de prova ficaram na cura úmida.

A magnitude da corrente galvânica, além de depender primariamente da diferença de potencial dos eletrodos submersos em um eletrólito e da cinética do ânodo e do cátodo, também é afetada pela resistividade do eletrólito (HUAFU *et al.*, 2015).

Helene (1993) afirma que a resistividade elétrica do concreto depende do grau de hidratação do cimento e eleva-se com o aumento desse. Quanto maior idade tenha o concreto, maior o progresso na hidratação do cimento e a resistividade aumenta (SILVA, 2016). Sendo assim, a resistividade elétrica dos corpos de prova do Bloco II é maior do que a resistividade elétrica dos corpos de prova do Bloco I.

4.2.7 Método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata (AgNO_3).

A Tabela 17 mostra as médias das medidas feitas em cada um dos corpos de prova do Bloco I. Esses valores representam as profundidades da frente de penetração de cloretos no interior de cada um dos corpos de prova.

Tabela 9: Profundidade da frente de penetração de cloretos nos corpos de prova do Bloco I_(1 d).

CORPO DE PROVA	MEDIDAS [cm]										MÉDIA
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
P-I-15-B1	1,0	0,9	2,7	2,8	4,6	4,8	3,6	4,9	1,1	1,1	3
P-II-15-B1	5,4	6,7	4,6	4,6	4,1	4,5	4,7	4,4	6,0	4,8	5
P-III-15-B1	6,9	7,2	6,2	5,6	5,4	4,4	3,9	4,8	6,5	5,7	6
P-IV-15-B1	8,5	8,1	7,3	4,4	4,2	3,4	4,1	5,2	6,6	7,9	6
P-I-30-B1	0,8	1,0	0,6	1,2	1,9	0,8	2,2	1,7	1,6	2,0	1
P-II-30-B1	4,8	3,3	4,6	5,6	3,5	3,3	2,4	2,3	2,3	2,9	3
P-III-30-B1	3,8	3,0	3,8	3,7	2,2	2,4	2,3	3,0	2,9	7,3	3
P-IV-30-B1	4,5	3,7	4,3	4,1	3,1	2,9	3,6	3,2	3,2	6,6	4

Fonte: Autor (2018)

No corpo de prova P-I-15-B1, a frente de penetração de cloretos chegou até uma profundidade de 3 cm, por tanto, os cloretos atingiram os quatro ânodos do sensor galvânico, mas não as barras. Isto justifica que durante nos últimos três ciclos o E_{corr} das barras tenha voltado a ser maior do que -200 mV, o E_{par} tenha diminuído até valores menores do que 200 mV/min. e que os maiores valores I_{gal} se registraram só durante o ciclo 6 quando foi introduzido cloretos no sistema aço-concreto. Na Figura 110 observa-se que o corpo de prova tinha

carbonatação perto das bordas com uma profundidade média de 1 cm e apresenta produto de corrosão em volta dos ânodos do sensor.

Figura 110: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-I-15-B1.



Fonte: Autor (2018)

No corpo de prova P-II-15-B1, a frente de penetração de cloretos chegou até uma profundidade de 5 cm em média, portanto, os cloretos atingiram os quatro ânodos do sensor galvânico e ficou 1 cm antes das barras que estavam a 6 cm com relação à superfície exposta à solução aquosa de NaCl (3,5 % em massa). A Figura 111 mostra o resultado do ensaio colorimétrico neste corpo de prova.

Nos corpos de prova P-III-15-B1 e P-IV-15-B1, a frente de penetração de cloretos chegou até uma profundidade de 6 cm, por tanto, os cloretos atingiram os quatro ânodos dos sensores galvânicos e os extremos das barras (6 cm de cobrimento) que foram protegidos com fita isolante na cor cinza, de forma que ficasse exposta uma parte das barras (6 cm de cobrimento) com o mesmo comprimento que os ânodos do sensor no centro do corpo de prova.

Assim, se justifica que a probabilidade de corrosão nas barras (6 cm de cobrimento) embebidas nesses três corpos de prova tenha permanecido menor do que 10%. Entretanto, os valores de E_{par} correspondentes indicaram reação galvânica quando a I_{gal} se mostrou positiva apesar de ter mostrado valores perto zero. Sendo assim, a frente de cloretos chegou até as barras ou 1 cm antes, mas o teor de cloretos não atingiu o nível crítico.

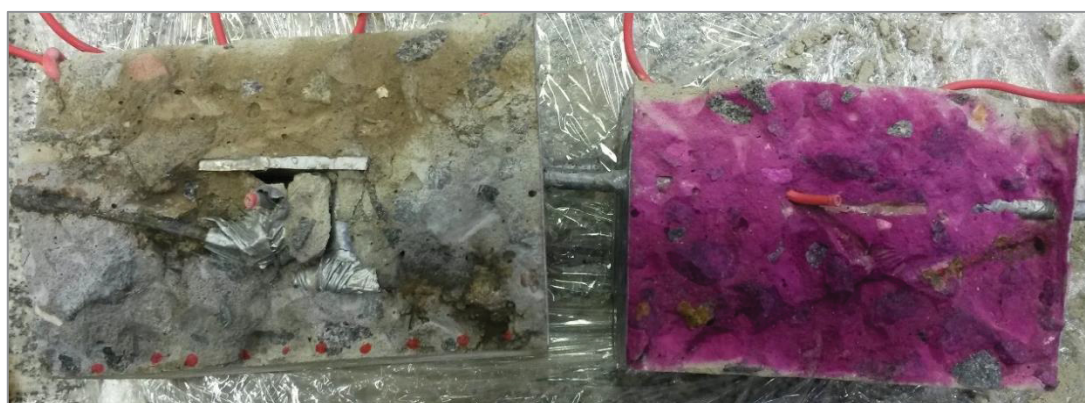
Nas Figuras 112 e 113 é possível enxergar inclusive produto de corrosão em volta dos ânodos dos sensores o que fundamenta os resultados observados neles durante os testes E_{corr} e E_{par} .

Figura 111: Resultado do ensaio colorimétrico no corpo de prova P-II-15-B1.



Fonte: Autor (2018)

Figura 112: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-III-15-B1.



Fonte: Autor (2018)

Figura 113: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-IV-15-B1.



Fonte: Autor (2018)

Resumindo, a frente de penetração de cloretos chegou mais perto das barras (6 cm de cobrimento) nos três corpos de prova do traço 15 MPa que estiveram em contato com a solução aquosa de NaCl em todos os ciclos. Nas figuras é possível enxergar também, que os corpos de prova apresentaram carbonatação nas bordas expostas ao ar, mas a maior profundidade de carbonatação foi de 1 cm e a menor foi de 0,8 cm, portanto, é improvável que o ensaio colorimétrico com AgNO_3 tenha indicado falsos positivos. A mesma

consideração pode ser feita com relação aos corpos de prova do traço 30 MPa, discutidos a continuação.

No corpo de prova P-I-30-B1 a frente de penetração de cloretos chegou até uma profundidade de 1 cm, por tanto, os cloretos atingiram os ânodos com o menor cobrimento. Isto fundamenta os resultados obtidos nos ânodos com 1,5 cm durante os testes de E_{corr} e E_{par} apresentados nas Figuras 69 e 84, respectivamente. Na Figura 114 observa-se que na fatia à esquerda foi aplicado $AgNO_3$ e na fatia da direita, fenolftaleína.

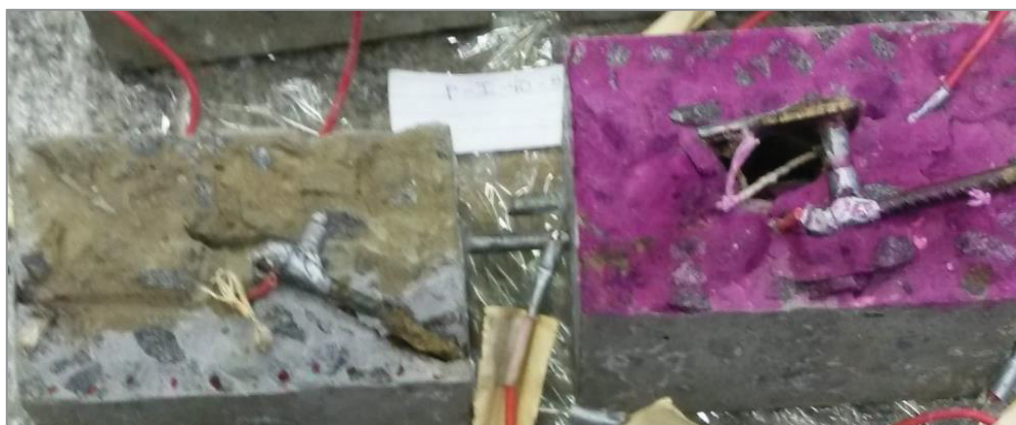
Figura 114: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-I-30-B1.



Fonte: Autor (2018)

Nos corpos de prova P-II-30-B1 e P-III-30-B1, a frente de penetração de cloretos chegou até uma profundidade de 3 cm, portanto, os cloretos atingiram os quatro ânodos do sensor, mas não as barras (6 cm de cobrimento). No entanto, em função dos resultados observados durante os testes de E_{corr} e E_{par} , é possível concluir que não foi atingido o nível crítico de cloretos para a despassivação dos ânodos com 2,5 cm de cobrimento. Entretanto, o E_{par} das barras (6 cm de cobrimento) ficou maior do que 400 mV/min. a partir do ciclo 4 e a I_{gal} se tornou positiva definitivamente no ciclo 6, mas a probabilidade de corrosão ficou menor do que 10 % durante todo o teste. Sendo assim, o E_{par} e a I_{gal} registrados nelas responderam a mudanças no eletrólito e não necessariamente indicaram uma mudança do estado passivo para o ativo. Na Figuras 115 e 116 se observa que a profundidade de carbonatação nas bordas expostas ao ar é no máximo de 0,3 cm.

Figura 115: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-II-30-B1.



Fonte: Autor (2018)

Figura 116: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-III-30-B1.



Fonte: Autor (2018)

No corpo de prova P-IV-30-B1, a frente de penetração de cloretos chegou até uma profundidade de 4 cm. Por tanto, os cloretos atingiram os quatro ânodos do sensor, mas não as barras (6 cm de cobrimento). O que justifica que a probabilidade de corrosão nas barras (6 cm de cobrimento) tenha ficado menor do que 10 % durante todo o teste. A Figura 117 mostra o resultado do ensaio colorimétrico neste corpo de prova.

Figura 117: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-IV-30-B1.

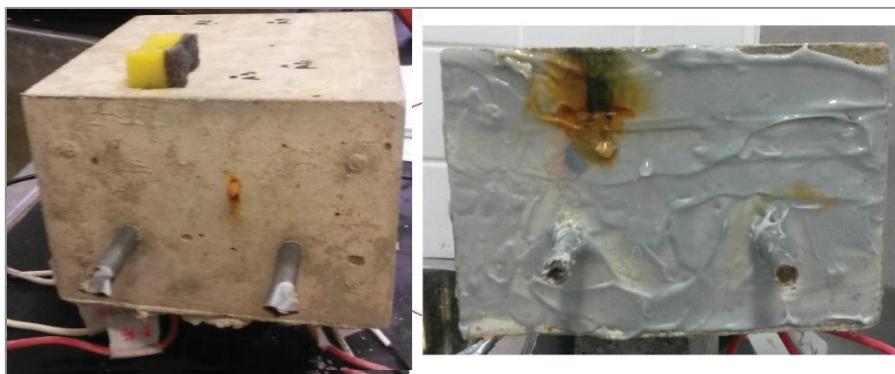


Fonte: Autor (2018)

Note-se que nos corpos de prova do traço 30 MPa, conforme mostra a Tabela 17, a frente de penetração de cloretos chegou até uma profundidade de 4 cm em média. Sendo assim, a profundidade da frente de cloretos foi maior nos corpos de prova do traço de 15 MPa deste Bloco I. A única diferença entre esses corpos de prova, é precisamente o traço usado na produção do concreto. A relação água/cimento do traço de 30 MPa é menor do que o traço de 15 MPa. Quanto maior a relação água/cimento, maior o teor de água em excesso na mistura do concreto que após a solidificação tende a evaporar fazendo do poro capilar uma via de acesso ao interior da peça de concreto (SILVA, 2016).

Já no Bloco II essa diferença entre os traços não teve um efeito significativo porque durante os dois primeiros ciclos as laterais dos corpos de prova não tinham sido cobertas com a tinta epóxi e o cobrimento lateral menor ou igual a 1 cm facilitou a entrada de cloretos para o interior das peças de cloretos. De forma tal que era possível observar a precipitação de produto de corrosão pelas faces laterais já no fim do ciclo 2, conforme mostra a Figura 118.

Figura 118: Precipitação de produto de corrosão pelas faces laterais dos corpos de prova do Bloco II no ciclo 2 e nos ciclos seguintes.



Fonte: Autor (2018)

A Tabela 18 mostra as médias das medidas feitas em cada um dos corpos de prova do Bloco II. Esses valores representam as profundidades da frente de penetração de cloretos no interior de cada um dos corpos de prova.

Tabela 10: Profundidade da frente de penetração de cloretos.

CORPO DE PROVA	MEDIDAS [cm]										MÉDIA
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
P-I-15-B2	9,3	8,2	8,0	7,4	7,6	8,4	8,7	8,5	10,0	8,4	8
P-III-15-B2	6,5	6,8	6,8	7,3	7,3	6,6	6,2	7,5	7,6	7,8	7
P-IV-15-B2	7,5	5,9	7,6	8,1	8,3	7,7	6,8	7,9	7,9	7,5	8
P-I-30-B2	7,6	5,7	6,1	8,1	7,9	6,9	7,3	6,7	7,4	7,5	7
P-II-30-B2	8,3	8,5	8,7	8,2	8,3	8,2	8,7	8,1	8,0	8,0	8
P-III-30-B2	8,2	6,7	5,1	7,5	7,0	7,1	6,9	7,4	7,7	7,3	7
P-IV-30-B2	7,9	8,0	7,9	7,8	7,0	7,8	6,5	6,8	6,5	7,2	7

Fonte: Autor (2018)

Nesses corpos de prova a frente de penetração de cloretos chegou até uma profundidade de 7 ou 8 cm. Por tanto, os cloretos atingiram os quatro ânodos do sensor e as barras. Isto fundamenta os resultados obtidos nos ânodos do sensor durante os testes de E_{corr} e E_{par} .

No entanto, o E_{par} das barras (6 cm de cobrimento) e o cátodo, indicou uma reação eletrolítica ou no máximo ficou no intervalo -5 a 20 mV/min. no caso do traço 30 MPa. Por outro lado, a probabilidade de corrosão ficou menor do que 10 % ou na zona de incerteza. Sendo assim, a frente de cloretos chegou até as barras (6 cm de cobrimento), mas o teor de íons cloretos no concreto em volta delas provavelmente não chegou a se tornar crítico. Nas Figuras 119 a 125 se observa que os corpos de prova não sofreram carbonatação.

Figura 119: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-I-15-B2.



Fonte: Autor (2018)

Na Figura 120 também é possível enxergar produto de corrosão envolta das barras do sensor, mas não ao redor da parte exposta da barra (6 cm de cobrimento) do corpo de prova. Deve-se lembrar que os extremos das barras principais foram protegidos com fita isolante na cor cinza.

Figura 120: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-III-15-B2.



Fonte: Autor (2018)

Na Figura 121 da mesma forma que nos corpos de prova P-I-15-B2 e P-III-15-B2 é possível observar produto de corrosão nos ânodos do sensor, porém, ao redor da parte exposta da barra principal não se vê produto de corrosão. Apesar que o concreto nessa área ter uma cor esbranquiçada. Isso confirma a teoria que o limite crítico de cloretos para a despassivação das armaduras a 6 cm não foi atingido. O mesmo pode-se dizer com relação aos corpos de prova do traço 30 MPa, mostrados nas Figuras 122 a 125.

Figura 121: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-IV-15-B2.



Fonte: Autor (2018)

Figura 122: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-I-30-B2.



Fonte: Autor (2018)

Figura 123: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-II-30-B2.



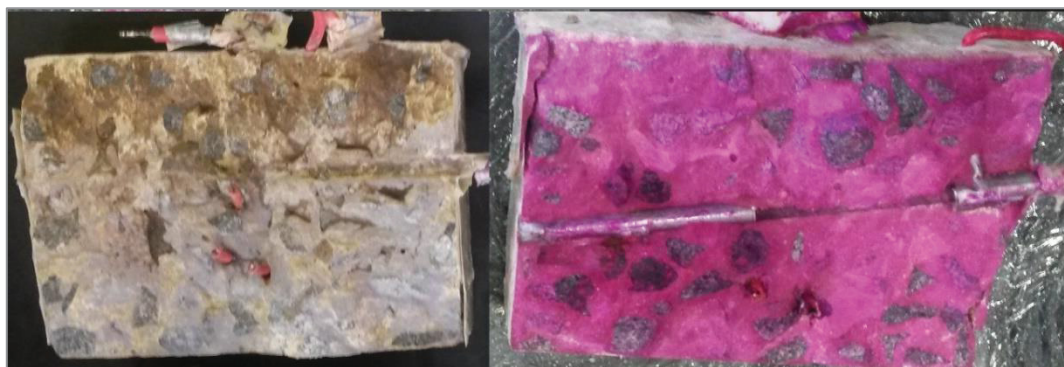
Fonte: Autor (2018)

Figura 124: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-III-30-B2.



Fonte: Autor (2018)

Figura 125: Ensaio colorimétrico no corpo de prova P-IV-30-B2.



Fonte: Autor (2018)

5. ANÁLISE ESTATÍSTICA E DISCUSSÃO.

Os dados foram estatisticamente analisados por meio do teste de Turkey para comparação de médias, com um intervalo de confiança de 95 %. Esse modelo basicamente é um teste de comparações múltiplas que tem como base a análise de variância ANOVA.

5.1. INFLUÊNCIA DO COBRIMENTO NOS RESULTADOS DE POTENCIAL DE CORROSÃO.

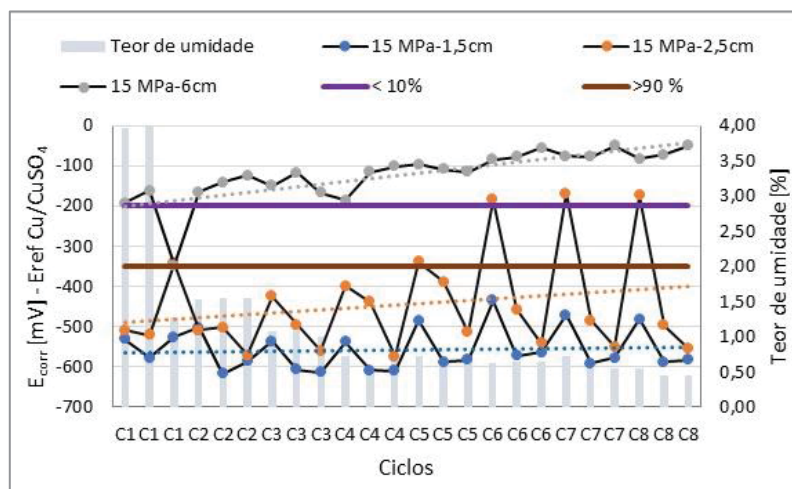
5.1.1 Bloco I – 1 dia de cura úmida.

A diferença entre os cobrimentos dos ânodos do sensor não influenciou nos resultados obtidos no teste de potencial de corrosão nos corpos de prova do Bloco I. Nos corpos de prova do traço 15 MPa, o fato das barras apresentarem o maior cobrimento (6 cm) determinou que o limite crítico de cloretos para a despassivação das armaduras a 6 cm não chegasse a ser atingido e consequentemente que o potencial de corrosão nelas fosse estatisticamente não equivalente ao potencial de corrosão dos ânodos.

Nos corpos de prova do traço 30 MPa, o fato das barras apresentarem o maior cobrimento (6 cm) determinou que a frente de cloretos não chegasse até elas e consequentemente os valores de potencial de corrosão registrados nos seis ânodos fossem estatisticamente não equivalentes.

A Figura 126 mostra os valores médios de potencial de corrosão e teor de umidade para os três corpos de prova do traço 15 MPa expostos à solução aquosa de NaCl durante os oito ciclos, assim como as barras de variação do teor de umidade médio dos corpos de prova.

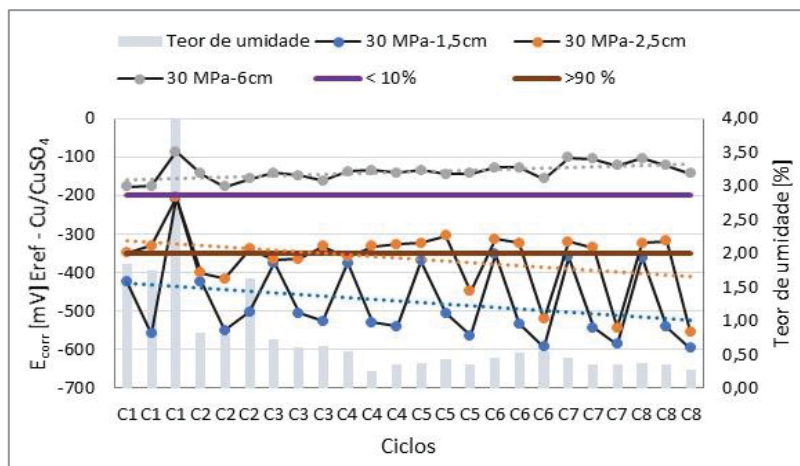
Figura 126: Valores médios de potencial de corrosão e teor de umidade para os três corpos de prova do traço 15 MPa expostos a Cl^- nos oito ciclos.



Fonte: Autor (2018)

A Figura 127 mostra os valores médios de potencial de corrosão e teor de umidade para os três corpos de prova do traço 30 MPa expostos à solução aquosa de NaCl.

Figura 127: Valores médios de potencial de corrosão e teor de umidade para os três corpos de prova do traço 30 MPa expostos a Cl^- nos oito ciclos.



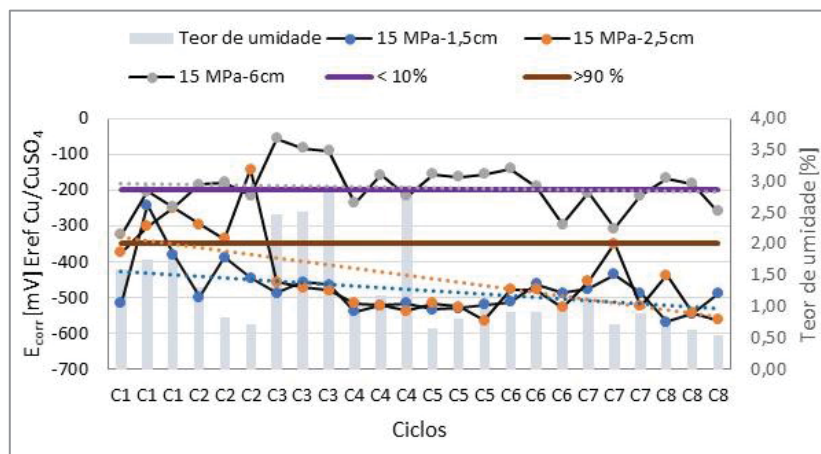
Fonte: Autor (2018)

5.1.2 Bloco II – 91 dias de cura úmida

Da mesma forma que no Bloco I, a diferença entre os cobrimentos dos ânodos do sensor não influenciou nos resultados obtidos no teste de potencial de corrosão. Entretanto, o fato das barras (6 cm de cobrimento) apresentarem o maior cobrimento contribuiu para que o limite crítico de cloretos para a despassivação das armaduras a 6 cm não chegasse a ser atingido e consequentemente que o potencial de corrosão nelas fosse estatisticamente não equivalente ao potencial de corrosão dos ânodos a partir do ciclo 3.

A Figura 128 mostra os valores médios de potencial de corrosão para os três corpos de prova do traço 15 MPa expostos à solução aquosa de NaCl, assim como apresenta os valores médios de teor de umidade dos corpos de prova.

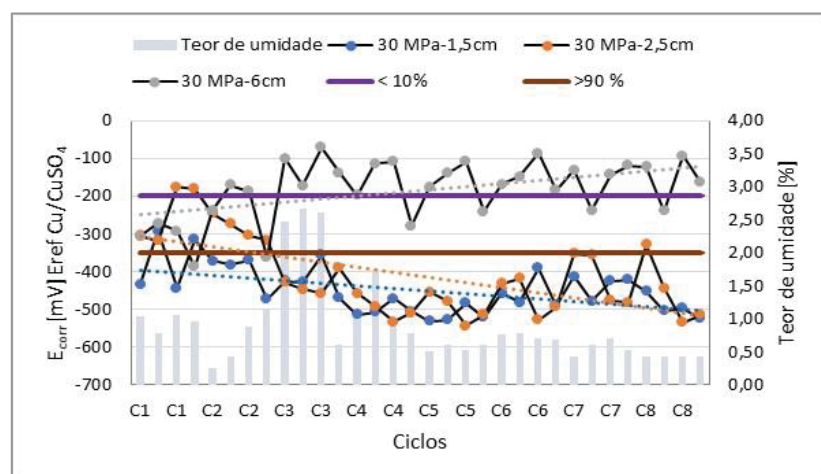
Figura 128: Valores médios de potencial de corrosão e teor de umidade para os três corpos de prova do traço 15 MPa.



Fonte: Autor (2018)

A Figura 129 mostra os valores médios de potencial de corrosão e teor de umidade para os quatro corpos de prova do traço 30 MPa expostos à solução aquosa de NaCl.

Figura 129: Valores médios de potencial de corrosão e teor de umidade para os quatro corpos de prova do traço 30 MPa.



Fonte: Autor (2018)

5.2. INFLUÊNCIA DO COBRIMENTO NOS RESULTADOS DE POTENCIAL DO PAR.

5.2.1 Bloco I – 1 dia de cura úmida

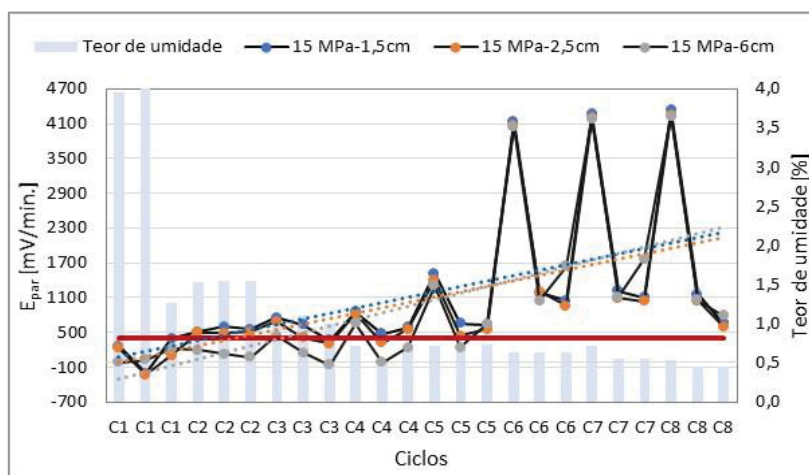
No Bloco I, a diferença entre os cobrimentos dos ânodos dos sensores não influenciou nos resultados obtidos no teste de potencial do par. Nos três corpos de prova do traço 15 MPa expostos à solução aquosa de NaCl durante os oito ciclos, os valores de potencial dos pares formados pelas barras (6 cm de cobrimento) e o cátodo foram estatisticamente equivalentes aos valores de

potencial dos pares dos sensores a partir do ciclo 3. Sendo assim, a diferença entre os cobrimentos não influenciou nos resultados obtidos nos seis pares durante o monitoramento do E_{par} .

Nos três corpos de prova do traço 30 MPa expostos à solução aquosa de NaCl durante os oito ciclos, o potencial dos pares correspondente às barras (6 cm de cobrimento) foi estatisticamente equivalente ao potencial dos ânodos com 2,5 cm de cobrimento durante os ciclos 2, 3 e 4. Nos ciclos 1, 5, 6, 7, 8 os valores de E_{par} dos seis pares foram estatisticamente equivalentes entre si.

A Figura 130 mostra os valores médios de potencial do par para os três corpos de prova do traço 15 MPa expostos à solução aquosa de NaCl durante os oito ciclos. Na figura, observa-se que os valores de potencial dos pares dos sensores se tornam maiores do que 400 mV/min. definitivamente logo no ciclo 2 e o E_{par} das barras (6 cm de cobrimento) no ciclo 5.

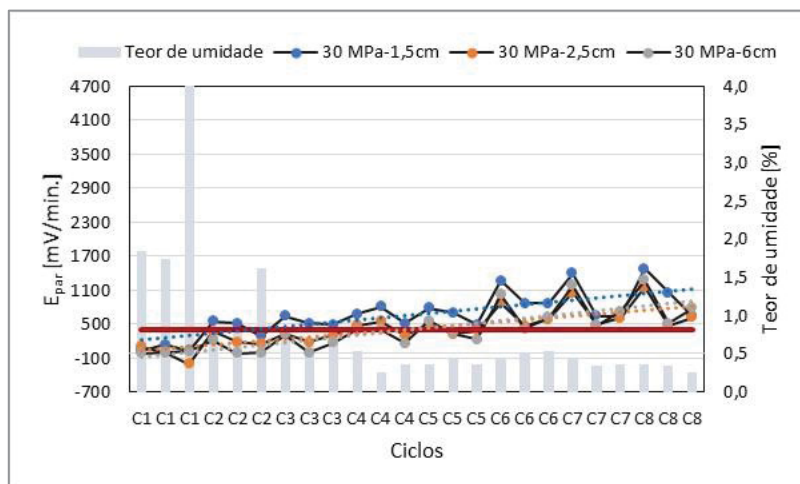
Figura 130: Valores médios de potencial do par e teor de umidade para os três corpos de prova do traço 15 MPa expostos a Cl^- nos oito ciclos.



Fonte: Autor (2018)

A Figura 131 mostra os valores médios de potencial do par para os três corpos de prova do traço 30 MPa expostos à solução aquosa de NaCl. Note-se que os valores de potencial dos pares com 1,5 cm de cobrimento se tornam maiores do que 400 mV/min. definitivamente no ciclo 2, dos pares com 2,5 cm de cobrimento no ciclo 4 e dos pares formados pelas barras (6 cm de cobrimento) e o cátodo no ciclo 5.

Figura 131: Valores médios de potencial do par e teor de umidade para os três corpos de prova do traço 30 MPa expostos a Cl⁻ nos oito ciclos.



Fonte: Autor (2018)

Neste Bloco I, os valores de E_{par} dos seis pares foram estatisticamente equivalentes entre si durante quase todo o experimento, tanto nos corpos de prova do traço 15 MPa como nos corpos de prova do traço 30 MPa. Porém, o E_{par} das barras (6 cm de cobrimento) ficou definitivamente maior do que 400 mV/min. no ciclo 5. Esse comportamento não foi determinado então pela diferença entre os cobrimentos, senão pela variação das características do eletrólito envolta dos ânodos ao longo do processo cíclico de envelhecimento. Este comportamento indica que o monitoramento de E_{par} para as condições do experimento realizado, não se mostrou um bom caminho para indicar a despassivação das armaduras.

5.2.2 Bloco II – 91 dias de cura úmida

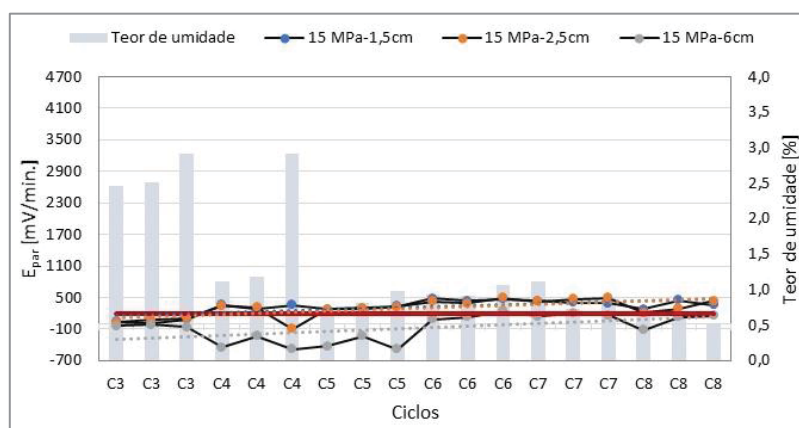
Nos três corpos de prova do traço 15 MPa, os potenciais dos quatro pares do sensor foram estatisticamente equivalentes entre si em todos os ciclos. Entretanto, os resultados obtidos nas barras (6 cm de cobrimento) só foram estatisticamente equivalentes aos valores obtidos nos pares do sensor nos ciclos 3 e 8. No Anexo H.1.1. se observa o explicado anteriormente.

No caso dos corpos de prova do traço 30 MPa, os potenciais galvânicos dos quatro pares do sensor também foram estatisticamente equivalentes durante todo o teste. Enquanto, que os resultados obtidos nas barras (6 cm de cobrimento) foram estatisticamente não equivalentes aos valores obtidos nos pares dos sensores.

Sendo assim, diferente do observado no Bloco I, o fato das barras apresentarem maior cobrimento contribuiu para que o E_{par} das barras (6 cm de cobrimento) fosse estatisticamente não equivalente ao potencial dos quatro pares do sensor.

A Figura 132 mostra os valores médios de potencial do par para os três corpos de prova, além dos respectivos valores de teor de umidade. Note-se que os valores de potencial dos pares do sensor se tornam maiores do que 200 mV/min. no ciclo 4 e que os potenciais correspondentes às barras se tornaram positivos, típicos de uma reação galvânica no ciclo 6, porém em uma faixa de valores menores do que os valores observados nos pares do sensor, com apenas um valor médio acima de 200 mV/min. o que indica que a intensidade da reação nos pares formados pelas barras e o cátodo foi menor do que nos pares do sensor.

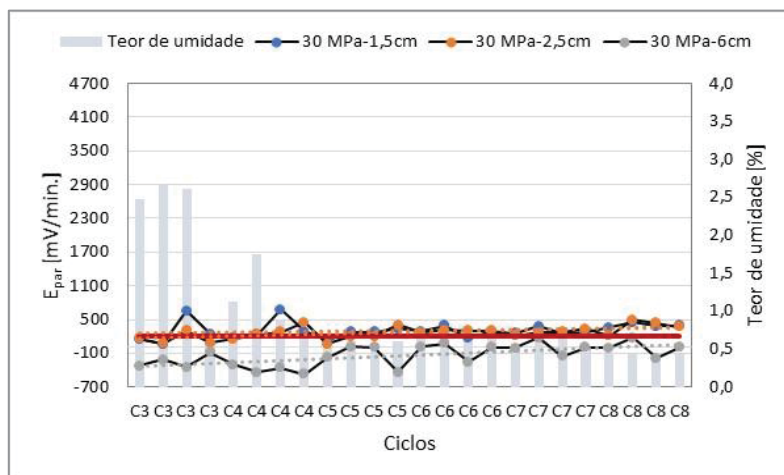
Figura 132: Valores médios de potencial do par e teor de umidade para os três corpos de prova do traço 15 MPa.



Fonte: Autor (2018)

A Figura 133 mostra os valores médios de potencial do par para os quatro corpos de prova. Note-se que os valores de potencial dos pares do sensor se tornam maiores do que 200 mV/min. definitivamente no ciclo 3 e que os potenciais correspondentes às barras ficaram negativos, típicos de uma reação eletrolítica ou no intervalo de 0 a 20 mV/min. indicando que efetivamente as barras (6 cm de cobrimento) ficaram em estado passivo.

Figura 133: Valores médios de potencial do par e teor de umidade para os quatro corpos de prova do traço 30 MPa.



Fonte: Autor (2018)

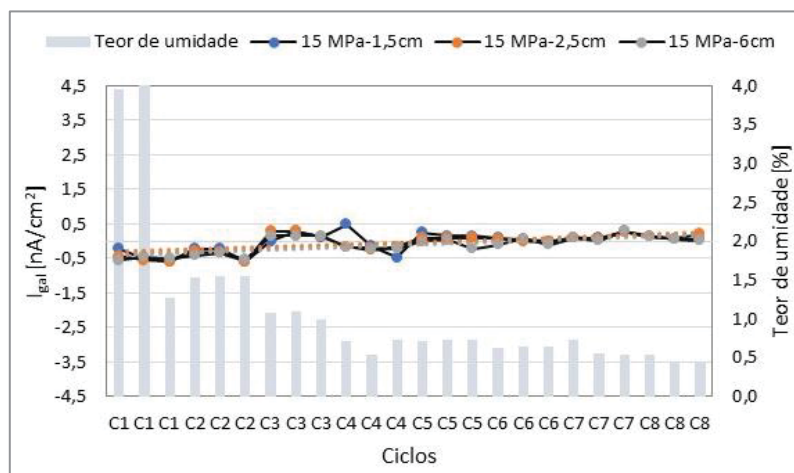
5.3. INFLUÊNCIA DO COBRIMENTO NOS RESULTADOS DE CORRENTE GALVÂNICA.

5.3.1 Bloco I – 1 dia de cura úmida

Nos três corpos de prova do traço de 15 MPa que ficaram expostos à solução aquosa de NaCl nos oito ciclos de envelhecimento, os valores registrados nos seis ânodos foram estatisticamente equivalentes, com exceção do ciclo 5, no qual os valores de I_{gal} dos ânodos dos sensores foram estatisticamente equivalentes entre si, mas os valores de I_{gal} das barras (6 cm de cobertura) foram não equivalentes aos valores registrados nos sensores. No caso do traço de 30 MPa os valores registrados nos seis ânodos foram estatisticamente equivalentes durante todo o experimento. Sendo assim, o cobrimento não influenciou nos resultados de corrente galvânica.

A Figura 134 mostra os valores de corrente galvânica médios obtidos ao longo do experimento nos ânodos embebidos no interior dos três corpos de prova expostos a cloretos. Os valores de I_{gal} ficaram perto de zero durante todo o experimento o que indica que o monitoramento da I_{gal} , não indicou oportunamente a despassivação nem dos ânodos do sensor que segundo o teste de E_{corr} passaram ao estado ativo rapidamente.

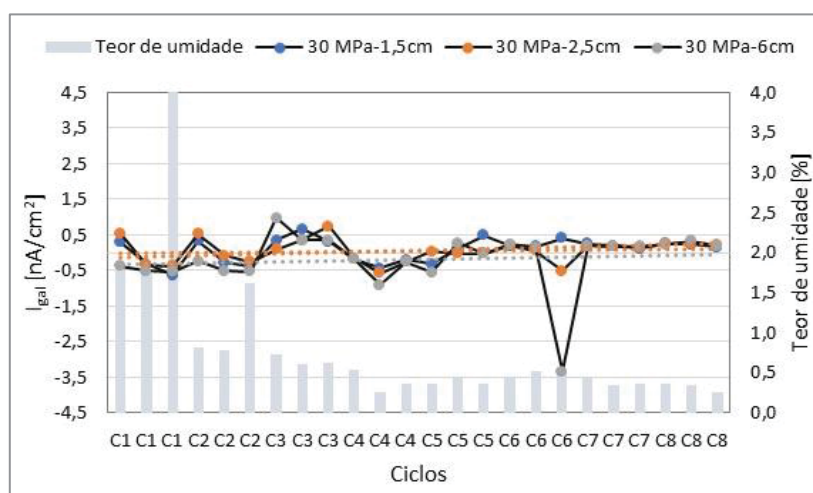
Figura 134: Valores de teor de umidade e corrente galvânica médios obtidos nos ânodos embebidos no interior dos três corpos de prova do traço 15 MPa expostos a Cl^- nos oito ciclos.



Fonte: Autor (2018)

A Figura 135 mostra os valores de teor de umidade e corrente galvânica médios obtidos ao longo do experimento nos ânodos embebidos no interior dos três corpos de prova expostos a cloretos. Assim como no traço de 15 MPa, a I_{gal} não acompanhou a transição dos ânodos do estado passivo para o ativo.

Figura 135: Valores de teor de umidade e corrente galvânica médios obtidos nos ânodos embebidos no interior dos três corpos de prova do traço 30 MPa expostos a Cl^- nos oito ciclos.



Fonte: Autor (2018)

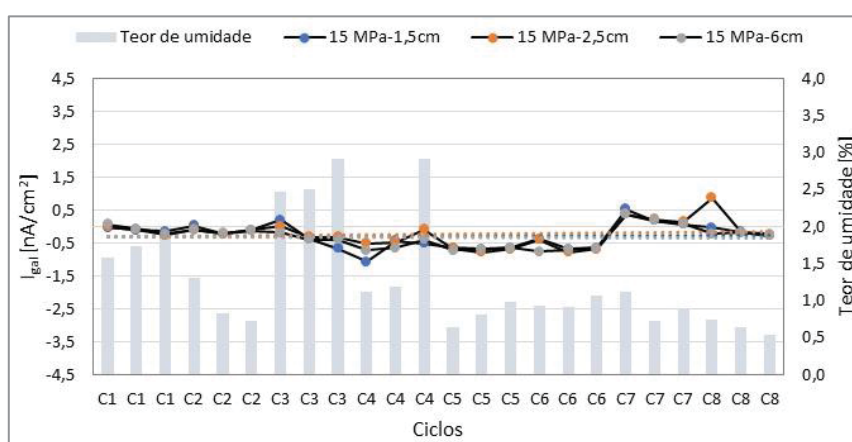
5.3.2 Bloco II – 91 dias de cura úmida

Em todos os corpos de prova do Bloco II, os valores registrados nos seis ânodos foram estatisticamente equivalentes durante todo o experimento. Nas Figuras 136 e 137 observa-se os valores de teor de umidade e corrente galvânica médios obtidos ao longo do experimento nos ânodos embebidos no interior dos

três corpos de prova do traço 15 MPa e no interior dos quatro corpos de prova do traço 30 MPa, respectivamente. Nos corpos de prova do traço 15 MPa foram registrados valores de I_{gal} maiores do que nos concretos de 30 MPa, mas próximos de zero

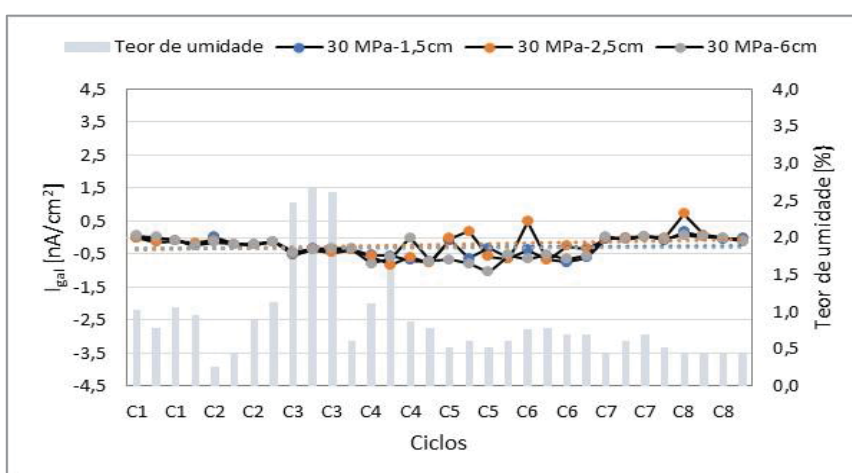
De forma semelhante ao observado no Bloco I, a I_{gal} registrada nos corpos de prova de ambos traços não aumentou na medida que o E_{par} aumentou. Teoricamente quanto maior a diferença de potencial no par galvânico (E_{par}) maior deve ser a intensidade da I_{gal} (ARAÚJO *et al.*, 2013; LACERDA e MULLER, 2015) o que não aconteceu. Assim, em nenhum dos blocos a I_{gal} foi capaz de distinguir barras ativas e barras passivas quanto a corrosão.

Figura 136: Valores de teor de umidade e corrente galvânica médios obtidos nos ânodos embebidos no interior dos três corpos de prova do traço 15 MPa.



Fonte: Autor (2018)

Figura 137: Valores de teor de umidade e corrente galvânica médios obtidos nos ânodos embebidos no interior dos quatro corpos de prova do traço 30 MPa.



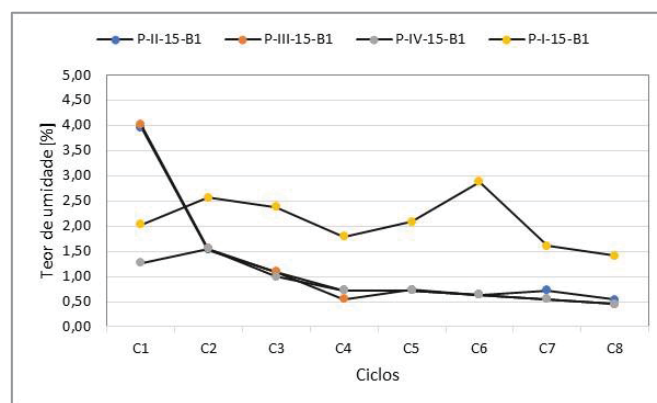
Fonte: Autor (2018)

5.4. INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE.

5.4.1 Bloco I – 1 dia de cura úmida

Os teores de umidade dos quatro corpos de prova do traço 15 MPa do Bloco I foram estatisticamente equivalentes somente durante o ciclo 1. Nos ciclos restantes o teor de umidade do P-I-15-B1 difere dos três restantes que se mostraram equivalentes entre si. Sendo assim, o teor de umidade variou de forma semelhante nos corpos de prova P-II-15-B1, P-III-15-B1 e P-IV-15-B1 ao longo do experimento. A variação nos resultados de E_{corr} , E_{par} e I_{gal} entre esses corpos de prova e o P-I-15-B1 foi influenciado pela diferença no teor de umidade entre eles. A Figura 138 mostra o comportamento do teor de umidade dos quatro corpos de prova ao longo do experimento.

Figura 138: Comportamento do teor de umidade dos quatro corpos de prova ao do traço 15 MPa ao longo do experimento.

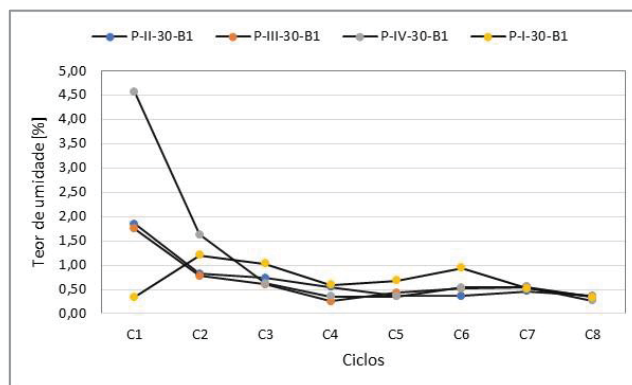


Fonte: Autor (2018)

Os teores de umidade dos quatro corpos de prova do traço 30 MPa do Bloco I foram estatisticamente equivalentes nos ciclos 4, 7 e 8. Entretanto, os teores de umidade do P-I-30-B1 foram estatisticamente equivalentes aos valores registrados no P-IV-30-B1 no ciclo 2 e no ciclo 3 aos valores obtidos no P-II-30-B1. Os valores correspondentes ao corpo de prova P-I-30-B1 não foram equivalentes aos valores obtidos em nenhum dos outros três corpos de prova nos ciclos 1, 5 e 6.

Sendo assim, o teor de umidade nos quatro corpos de prova se comportou de forma semelhante e não foi um fator que determinou as diferenças observadas entre o corpo de prova P-I-30-B1 e os restantes corpos de prova do traço 30 MPa do Bloco I. Apesar que o teor de umidade dele foi o menor durante o ciclo 1. A Figura 139 mostra o comportamento do teor de umidade dos quatro corpos de prova ao longo do experimento.

Figura 139: Comportamento do teor de umidade dos quatro corpos de prova do traço 30 MPa ao longo do experimento.



Fonte: Autor (2018)

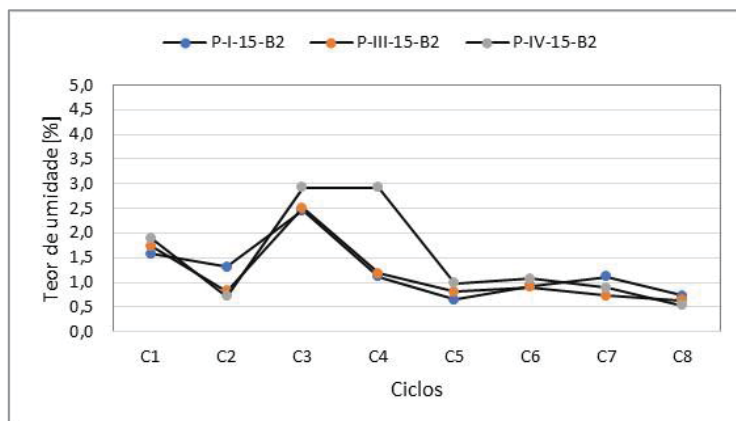
Nos seis corpos de prova do Bloco I que foram expostos à solução aquosa de NaCl durante os oito ciclos de envelhecimento, se observa que na medida que o teor de umidade diminuiu, os valores de E_{corr} dos ânodos dos sensores se tonaram mais eletronegativos, exceto os valores de E_{corr} dos ânodos a 2,5 cm no corpo de prova P-II-15-B1, que assim como o E_{corr} das barras (6 cm de cobrimento) nos seis corpos de prova, apresentou tendência a se tornar menos eletronegativo. Além disso, o E_{par} dos pares dos sensores e das armaduras a 6 cm manteve tendência a aumentar e a I_{gal} teve tendência a se tornar positiva definitivamente, porém, em uma faixa de valores perto de zero.

Sendo assim, os resultados obtidos nas armaduras a 6 cm não estão em concordância, porque se o E_{corr} se tornou menos eletronegativo, o E_{par} deveria ter se mantido negativo ou pelo menos indicando pouca intensidade da reação de corrosão no par galvânico. Assim, seria coerente que a I_{gal} tenha permanecido perto de zero. A mesma consideração pode ser feita com relação aos ânodos a 2,5 cm no corpo de prova P-II-15-B1. Os resultados correspondentes aos três corpos de prova do traço 15 MPa se observam nas Figuras 126, 130 e 134, e os correspondentes aos três corpos de prova do traço 30 MPa nas Figuras 127, 131 e 135.

5.4.2 Bloco II – 91 dias de cura úmida

Durante todo o experimento, os valores de teor de umidade obtidos nos corpos de prova do Bloco I, foram estatisticamente equivalentes. Sendo assim, a variação do teor de umidade não foi um fator que determinou as diferenças observadas entre os corpos de prova nos diferentes testes que foram desenvolvidos. A Figura 140 mostra o comportamento do teor de umidade dos três corpos de prova do traço 15 MPa do Bloco II, ao longo do experimento.

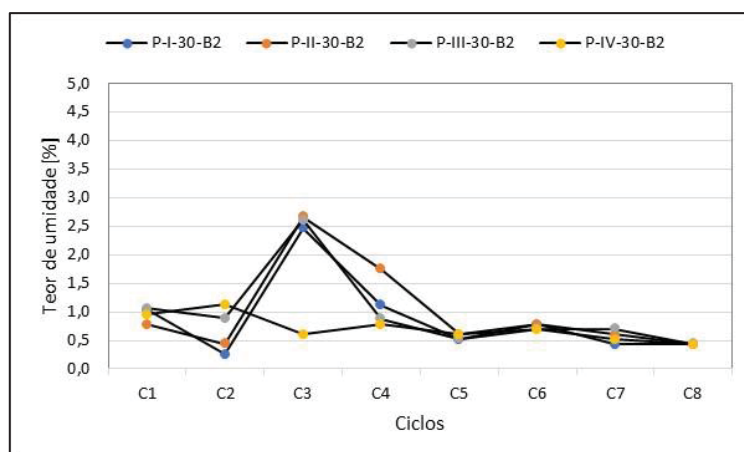
Figura 140: Comportamento do teor de umidade dos três corpos de prova do traço 15 MPa ao longo do experimento.



Fonte: Autor (2018)

A Figura 141 mostra o comportamento do teor de umidade dos quatro corpos de prova do traço 30 MPa do Bloco II, ao longo do experimento.

Figura 141: Comportamento do teor de umidade dos três corpos de prova do traço 30 MPa ao longo do experimento.



Fonte: Autor (2018)

Comparando estatisticamente os valores de teor de umidade dos três corpos de prova do traço 15 MPa do Bloco I expostos a Cl^- durante os oito ciclos, e os valores de teor de umidade dos corpos de prova do traço 15 MPa do Bloco II, é possível constatar que os resultados obtidos em ambos blocos foram estatisticamente equivalentes durante 5 dos 8 ciclos. Portanto, o tempo de cura úmida não influenciou significativamente na capacidade de absorção dos corpos de prova do traço 15 MPa.

No caso do traço de 30 MPa, os teores de umidade dos corpos de prova do Bloco I, expostos a Cl^- durante os oito ciclos, e os teores de umidade dos corpos de prova do Bloco II, foram estatisticamente equivalentes nos ciclos 1, 2, 3 e 7. Nos ciclos 4, 5, 6 e 8 foram estatisticamente não equivalentes. Sendo

assim, o tempo de cura úmida influenciou parcialmente na capacidade de absorção dos corpos de prova do traço 30 MPa.

Por outro lado, nos sete corpos de prova do Bloco II na medida que o teor de umidade diminuiu nos corpos de prova, os valores de E_{corr} dos ânodos dos sensores se tornaram mais eletronegativos, porém, o E_{corr} das barras (6 cm de cobertura) se manteve estável em uma faixa de valores acima de -350 mV. O E_{par} dos quatro pares dos sensores e das armaduras a 6 cm manteve tendência a aumentar. Enquanto que a I_{gal} aparentemente aumentou, mas se manteve perto de zero.

Tendo em conta que o E_{par} das armaduras a 6 cm aumentou, mas na faixa dos valores negativo ou até mesmo positivos, mas indicando pouca intensidade da reação de corrosão, os resultados observados nos testes de E_{corr} e E_{par} estão em concordância em ambos traços. O comportamento da I_{gal} mais uma vez não foi coerente.

No traço de 15 MPa, o aumento dos valores de potencial dos pares dos sensores, acompanhou a transição dos ânodos com 2,5 cm de cobertura do estado passivo para o ativo e o crescimento da eletronegatividade do potencial de corrosão dos eletrodos com 1,5 cm de cobertura. No traço 30 MPa, os resultados de ambos os testes não estiveram em concordância no corpo de prova P-I-30-B2.

Os resultados correspondentes aos três corpos de prova do traço 15 MPa se observam nas Figuras 128, 132 e 136, e os correspondentes aos quatro corpos de prova do traço 30 MPa nas Figura 129, 133 e 137.

5.5. INFLUÊNCIA DO NÍVEL DE RESISTÊNCIA.

No Bloco I, dois corpos de prova foram submetidos à solução aquosa de NaCl somente no começo do ciclo 6. Um corpo de prova do traço 15 MPa e um do traço 30 MPa. Portanto, a presente análise só foi feita com os corpos de prova que ficaram expostos à penetração de cloretos em todos os ciclos. Entretanto, no Bloco II a análise foi feita entre os quatro corpos de prova do traço 30 MPa e os três do traço 15 MPa. Neste último conjunto foi necessário desconsiderar os resultados obtidos em um dos corpos de prova já que o sensor ficou instalado de forma inversa, isso foi um erro que foi constatado ao final do experimento, quando os corpos de prova foram rompidos para determinar a profundidade de penetração de cloretos pelo método colorimétrico de aspersão de solução aquosa de nitrato de prata.

5.5.1 Teste de potencial de corrosão

No Bloco I, os resultados obtidos nos seis ânodos nos corpos de prova do traço de 15 MPa, foram estatisticamente equivalentes aos valores de E_{corr} registrados nos ânodos nos corpos de prova do traço de 30 MPa, nos ciclos 1,

4, 5, 6, 7 e 8. Nos ciclos 2 e 3 os valores obtidos nas barras (6 cm de cobrimento) e nos ânodos com 1,5 cm de cobrimento, foram estatisticamente equivalentes para os dois níveis de resistência à compressão. Sendo assim, a resistência do concreto não influenciou nos resultados obtidos durante o teste de potencial de corrosão e o comportamento dessa grandeza nos corpos de prova de ambos traços foi o mesmo.

No Bloco II, os resultados obtidos nos ânodos com 1,5 cm de cobrimento nos corpos de prova do traço 15 MPa, foram estatisticamente equivalentes aos valores de potencial de corrosão registrados nos ânodos com o mesmo cobrimento nos corpos de prova do traço 30 MPa em todos os ciclos. O mesmo se cumpre para os ânodos colocados a 2,5 cm e 6 cm. Portanto, a resistência do concreto também não influenciou nos resultados obtidos durante o teste de potencial de corrosão.

5.5.2 Teste do potencial do par

Em ambos blocos, os resultados obtidos nos seis ânodos nos corpos de prova do traço de 15 MPa, foram estatisticamente equivalentes aos valores de potencial do par registrados nos ânodos com os mesmos cobrimentos nos corpos de prova do traço de 30 MPa em sete dos oito ciclos ou ao longo de todo o experimento. Portanto, a resistência do concreto não influenciou nos resultados obtidos durante o teste de potencial do par.

5.5.3 Teste de corrente galvânica

No Bloco I, os resultados obtidos nos ânodos dos sensores colocados a 1,5 cm, 2,5 cm e 6 cm nos corpos de prova do traço de 15 MPa, foram estatisticamente equivalentes aos valores de corrente galvânica registrados nos ânodos com o mesmo cobrimento nos corpos de prova do traço de 30 MPa durante todo o experimento com exceção do ciclo 8. No ciclo 8, os valores de I_{gal} obtidos nas barras (6 cm de cobrimento) embebidas nos corpos de prova do traço 15 MPa, não foram estatisticamente equivalentes aos valores de I_{gal} nas barras (6 cm de cobrimento) nos corpos de prova do traço 30 MPa, nos quais a corrente foi maior. Sendo assim, a resistência do concreto não influenciou nos resultados obtidos durante o teste de corrente galvânica.

De forma semelhante, no Bloco II somente no ciclo 7, os valores de I_{gal} obtidos nas barras (6 cm de cobrimento) embebidas nos corpos de prova do traço 15 MPa não foram estatisticamente equivalentes aos valores de I_{gal} nas barras (6 cm de cobrimento) nos corpos de prova do traço 30 MPa nos quais a corrente foi negativa. Sendo assim, a resistência do concreto tampouco influenciou nos resultados obtidos durante o teste de corrente galvânica.

5.5.4 Teor de umidade

Os teores de umidade dos corpos de prova do Bloco I, de ambos os traços, foram estatisticamente equivalentes nos ciclos 1, 2, 4. Não foram nos restantes cinco ciclos. No Bloco II, os teores de umidade dos corpos de prova de ambos os traços, foram estatisticamente equivalentes nos ciclos 2, 3 e 4. Não foram nos restantes cinco ciclos. Portanto, a resistência do concreto influenciou na variação do teor de umidade fundamentalmente no começo do experimento em ambos os blocos.

6. ANÁLISE CRÍTICA

Este item foi dedicado à elaboração de uma crítica com relação aos procedimentos empregados no experimento que foi desenvolvido para esta dissertação de mestrado. Isso se refere a alguns detalhes que foram implementados na prática laboratorial, mas que podem ter sido fonte de interferência nas conclusões do trabalho. O intuito foi o de registrar algumas constatações que foram um aprendizado adquirido ao longo do trabalho experimental e que levariam esta pesquisadora a modificar o processo de teste, caso a pesquisa fosse reiniciada. Considera-se este registro importante para servir como base para outros pesquisadores que venham a desenvolver pesquisas na área de sensores de corrosão, em especial os sensores galvânicos.

6.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE E_{corr} , E_{par} e E_{par} .

Durante o teste de potencial de corrosão se observou o mesmo comportamento em ambos blocos. A probabilidade de um processo de corrosão estar ativo nos ânodos dos sensores resultou maior do que 90 % desde o começo do experimento. Entretanto, a probabilidade de corrosão nas barras (6 cm de cobrimento) ficou menor do que 10 % ou na zona de incerteza com valores de potencial de corrosão no intervalo de -200 a -350 mV.

M. Raupach e P. Schiebl (2001) estudaram o desempenho do sensor galvânico Sensor de escada (*Anode Ladder*), formado por barras retas posicionadas em paralelo, de aço-carbono, constituintes do ânodo e uma barra de titânio revestido com uma mistura de óxidos de metais nobres que foi usada como cátodo. Durante os testes de laboratório os sensores foram instalados em furos feitos nos corpos de prova 137 dias após a moldagem. O ensaio cíclico começou uma semana depois da instalação dos sensores.

O ensaio consistiu na aplicação de uma solução aquosa com 1 % de NaCl na superfície do concreto a intervalos regulares para investigar o efeito dos ciclos de molhagem e secagem. No primeiro ciclo do ensaio os dois primeiros ânodos do Sensor de Escada, instalados mais perto da superfície exposta do concreto, indicaram atividade. De forma semelhante, ao observado nesta pesquisa.

Entretanto, os valores de potencial do par registrados nos corpos de prova do Bloco I adotaram valores acima dos 200 mV/min. rapidamente e mantiveram tendência a aumentar ao longo do experimento, o que nem sempre esteve em concordância com os valores de potencial de corrosão registrados nas barras com 6 cm de cobrimento e nos ânodos com 2,5 cm de cobrimento nos corpos de prova P-II-15-B1, P-II-30-B1 e P-III-30-B1. No Bloco II, esse tipo de discordância foi observada no corpo de prova P-I-30-B2.

Angst e Buchler (2015) expõem algumas dificuldades intrínsecas ao monitoramento do potencial misto de uma macro-célula galvânica que poderiam

explicar o comportamento observado durante o monitoramento do E_{par} : (i) as reações anódicas e catódicas ocorrem geralmente no mesmo elemento estrutural, (ii) ou não é possível colocar eletrodos de referência perto do ânodo e do cátodo (iii) ou a condutividade do eletrólito é muito alta e, portanto, a diferença de potencial muito baixa para ser medida com precisão.

Note-se, no entanto, que Angst e Buchler (2015) se referem a macro-célula formada sobre a superfície de uma barra de aço, produto da penetração de cloretos no concreto que provoca corrosão localizada. Um sensor galvânico, de forma diferente, é formado por pequenos trechos de metal com potenciais elétricos diferentes onde um atuará como ânodo e outro como cátodo; embutidos no concreto em diferentes profundidades, sempre menores do que a da armadura (ANDRADE *et al.*, 2008; ARAÚJO *et al.*, 2013) o que diminui a influência da condutividade do eletrólito.

Resta considerar então o aspecto (ii) mencionado pelos autores: a possibilidade de colocar eletrodos de referência perto do ânodo e do cátodo. Assim, nos testes futuros que venham a utilizar o sensor galvânico proposto na presente pesquisa, é recomendável instalar também um eletrodo de referência. Esta prática possibilitará determinar de forma separada o potencial do ânodo e do cátodo e assim poder determinar a curva de polarização de cada eletrodo.

Também recomenda-se considerar um metal mais nobre do que o cobre para atuar como cátodo. Além de acompanhar o comportamento do potencial do par e do potencial de corrosão em um meio livre de agentes agressivos até que o potencial misto do sensor se estabilize em um valor positivo, porém, menor do que 20 mV/min. baseado nos resultados observados neste trabalho. Para identificar realmente o valor limite de E_{par} que separa o estado ativo do passivo. Neste caso, aparentemente o valor que separa o estado passivo do ativo no Bloco II, 200 mV/min. e no Bloco I, 400 mV/min.

A pesar de tudo, segundo os autores Angst e Buchler (2015), esta técnica de monitoramento é aprovada na literatura sempre que seja controlada a geometria da célula galvânica, bem como a posição do eletrodo de referência e do contra eletrodo se a macro-célula for utilizada também para determinar a resistência à polarização. Sendo assim, seria interessante avaliar o comportamento da corrente galvânica em um sensor galvânico com uma razão A_c/A_a (área do cátodo/área do ânodo) igual a 1.

6.2. EFEITO DO COBRIMENTO LATERAL.

Em ambos os blocos, os sensores ficaram com um cobrimento menor do que 1 cm nas faces laterais, como evidenciado na Figura 142. Desse modo, as superfícies laterais dos corpos de prova foram isoladas da exposição a cloretos

com uma tinta epóxi com a intenção de fazer com que a frente de contaminação só avance pela face com o cobrimento de 6 cm.

Figura 142: Corpos de prova com cobrimento lateral pequeno.



Fonte: Autor (2018)

Particularmente no Bloco II, as laterais dos corpos de prova durante os primeiros dois ciclos não tinham sido cobertas com a tinta epóxi, isso somado ao cobrimento lateral pequeno, facilitou a entrada de cloretos para o interior das peças de concreto. Por este motivo, era possível observar a precipitação de produto de corrosão pelas faces laterais já no fim do ciclo 2, conforme mostra a Figura 118. Este foi um ponto de falha do experimento, pois o início da corrosão deveria ter ocorrido pelo acesso dos íons cloretos através de uma só face.

Posteriormente, antes de começar o ciclo 3, foi aplicada uma tinta epóxi, porém, ao longo dos testes laboratoriais a película formada pela tinta ressecou e se separou da superfície de concreto, conforme mostra a Figura 143. Dessa forma os corpos de prova do Bloco II voltaram a ficar expostos à penetração de cloretos através das faces laterais. A partir dos resultados do Ensaio colorimétrico com Nitrato de prata é possível constatar que a frente de penetração de cloretos chegou até uma profundidade de 7 ou 8 cm nos oito corpos de prova do bloco.

Figura 143: Estado da película de tinta epóxi nos corpos de prova do Bloco II.



Fonte: Autor (2018)

De modo diferente, nos corpos de prova do Bloco I, a película formada pela tinta não ressecou nem se separou da superfície de concreto, mas os corpos de prova apresentaram fissuras, conforme mostra a Figura 144. Provavelmente devido ao processo cíclico de molhagem e secagem adotado que envolvia uma exposição em estufa a 50 °C. Vale registrar que isso não ocorreu no Bloco II, em que a cura foi de 91 dias.

A probabilidade de isso ter acontecido devido a reação álcalis – agregado foi descartada já que no ensaio acelerado em barras de argamassa, conforme prescreve a ABNT NBR 15577-4 (2009), a combinação de ambos agregados com o cimento CP-II-F-32 apresentou-se potencialmente não reativa, e esse foi o cimento usado para a moldagem dos corpos de prova prismáticos na segunda etapa do programa experimental.

Figura 144: Micro-fissuras nos corpos de prova do Bloco I.



Fonte: Autor (2018)

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1. CONCLUSÕES

7.1.1 Primeira etapa - Testes em solução aquosa

POTENCIAL DO PAR

Esperava-se que os sensores se comportassem como um semi-eletrodo de referência capaz de manter ou voltar a um valor médio de potencial no transcurso do tempo. Porém, cada par mostrou um comportamento diferenciado. A variação no valor de potencial dos pares resultou ser maior do que 1mV/min entre leituras demonstrando por tanto um comportamento instável.

A experiência com o Sensor A e Sensor B, mostra que não é possível determinar um potencial médio para o sensor de forma geral, como esperado. Desse modo, deve-se analisar o potencial de cada um dos quatro pares do sensor de forma individual e monitorar a sua alteração que ocorre no sentido de ficar mais eletropositivo quando o meio for contaminado por cloretos.

Mas de forma geral, é possível observar um comportamento padrão em ambos os sensores. No começo do monitoramento, o potencial dos pares foi negativo (reação eletrolítica). A contaminação com NaCl da solução aquosa saturada com $\text{Ca}(\text{OH})_2$ teve um efeito imediato no potencial de todos os pares provocando que os valores de potencial dos pares se tornaram positivos (reação galvânica) e com tendência a aumentar no tempo.

CORRENTE GALVÂNICA.

Pode-se afirmar que quando é atingido um nível crítico de cloretos, a corrente galvânica aumenta, porém, com uma inercia maior do que o potencial do par (E_{par}). No trabalho, as leituras de corrente galvânica, em ambos sensores mesmo ainda após a adição de cloreto à solução aquosa saturada de hidróxido de cálcio, continuaram sendo muito baixas. O teste do potencial do par resultou ser mais sensível à contaminação com cloretos do que o teste de corrente galvânica.

7.1.2 Segunda etapa - Testes em corpos de prova de concreto armado

POTENCIAL DE CORROSÃO.

Durante o teste de potencial de corrosão se observou o mesmo comportamento em ambos blocos. A probabilidade de um processo de corrosão estar ativo nos ânodos dos sensores resultou maior do que 90 % desde o começo do experimento. Entretanto, a probabilidade de corrosão nas barras (6 cm de cobrimento) ficou menor do que 10 % ou na zona de incerteza com valores de potencial de corrosão no intervalo de -200 a -350 mV. No Bloco II (91 d) os ânodos com cobrimento de 2,5 cm passaram ao estado ativo no ciclo 3, 86 dias depois de ter começado o processo de envelhecimento. Nos corpos de prova do

Bloco I (1 d) o potencial de corrosão se comportou de forma semelhante nos quatro ânodos dos sensores galvânicos.

Os resultados obtidos nos sensores durante esse teste estiveram condicionados por quatro fatores, a saber: (i) os pequenos cobrimentos laterais, (ii) o desempenho pobre da película de tinta epóxi, (iii) o efeito da alta temperatura no início do ciclo de imersão parcial após um período de 5 dias de secagem o que tornou a condição de exposição mais crítica, (iv) e a natureza higroscópica dos íons cloretos. Esses fatores também tiveram efeito sobre os resultados do potencial do par.

POTENCIAL DO PAR.

A partir da análise dos resultados obtidos no Bloco II, é possível concluir que enquanto o valor de potencial do par ficou negativo ou menor do que 20 mV/min. a probabilidade de corrosão do ânodo era menor do que 10 % ou encontrava-se na zona de incerteza. Quando o potencial do par ficou no intervalo de 20 a 200 mV/min. os ânodos com 1,5 cm de cobertura já estavam no estado ativo ou no processo de transição do estado passivo para o ativo no caso dos pares colocados a 2,5 cm.

De modo diferente no Bloco I, os valores de potencial do par adotaram valores acima dos 200 mV/min. rapidamente e mantiveram tendência a aumentar ao longo do experimento, o que nem sempre esteve em concordância com os valores de potencial de corrosão registrados nas barras com 6 cm de cobertura e nos ânodos com 2,5 cm de cobertura. Este comportamento indica que o monitoramento de E_{par} para as condições do experimento realizado, não se mostrou um bom caminho para indicar a despassivação das armaduras.

CORRENTE GALVÂNICA.

Em ambos blocos, a corrente galvânica ficou perto de zero durante todo o teste. Sendo assim, da mesma forma que o acontecido na primeira etapa do programa experimental com os sensores embebidos em uma solução aquosa, a I_{gal} mostrou uma inércia maior para identificar a presença de um agente agressivo.

INFLUÊNCIA DO COBRIMENTO

Em ambos blocos, a diferença de 1,5 cm para 2,5 cm entre os cobrimentos dos ânodos dos sensores não influenciou nos resultados obtidos durante o teste de potencial de corrosão, potencial galvânico e corrente galvânica.

De modo diferente, no Bloco II, o fato das armaduras a 6 cm apresentarem o maior cobertura determinou que o limite crítico de cloretos para a despassivação das mesmas não chegasse a ser atingido e conseqüentemente que o E_{corr} e E_{par} nelas fosse estatisticamente não equivalente ao E_{corr} e E_{par} dos ânodos dos sensores.

O comportamento descrito anteriormente, também se observou nos corpos de prova do traço 15 MPa do Bloco I, no teste de E_{corr} . Entretanto nos corpos de prova do traço 30 MPa, o cobrimento de 6 cm das barras contribuiu para que a frente de cloretos não chegasse até elas e conseqüentemente que o E_{corr} delas fosse estatisticamente não equivalente ao E_{corr} dos ânodos do sensor. Porém, essa diferença entre os cobrimentos dos ânodos dos sensores e as armaduras a 6 cm não influenciou nos resultados obtidos durante o monitoramento do E_{par} .

Uma explicação possível para as diferenças observadas entre as armaduras a 6 cm e os ânodos dos sensores com 1,5 e 2,5 cm de cobrimento, é que secagem durante os ciclos de envelhecimento pode ter sido uma condição de exposição crítica que causou microfissuração até o cobrimento dos ânodos a 1,5 e 2,5 cm, porém, essa microfissuração não chegou à profundidade de 6 cm, onde encontravam-se as barras principais.

INFLUÊNCIA DA VARIACÃO DO TEOR DE UMIDADE.

Em ambos blocos, os teores de umidade dos corpos de prova que ficaram expostos à penetração de cloretos, foram estatisticamente equivalentes durante todo o experimento e com tendência a diminuir ao longo do experimento. Essa tendência de diminuir ao longo do tempo pode estar relacionada à cristalização do sal no interior da rede de poros.

Nos dois blocos, na medida que o teor de umidade diminuiu, os valores de E_{corr} dos ânodos dos sensores se tornaram mais eletronegativos. De forma diferente, o E_{corr} das barras (6 cm de cobrimento), apresentou tendência a se tornar menos eletronegativo. Também na medida que o teor de umidade diminuiu, o E_{par} dos quatro pares dos sensores e das armaduras a 6 cm manteve tendência a aumentar, enquanto que a I_{gal} aparentemente aumentou, mas se manteve perto de zero.

No Bloco I, os resultados registrados nas fundamentalmente nas barras durante os testes de E_{corr} e E_{par} não estão em concordância. Porque se o E_{corr} se torna menos eletronegativo, o E_{par} deve-se manter negativo ou indicando pouca intensidade na reação de corrosão do par galvânico. Nesse contexto, é coerente que a I_{gal} permaneça perto de zero.

No Bloco II, como o E_{par} das armaduras a 6 cm aumentou na faixa dos valores negativo ou até mesmo positivos, porém, indicando pouca intensidade na reação de corrosão, os resultados observados nos testes de E_{corr} e E_{par} estão em concordância.

A diferença entre os tempos de cura úmida não influenciou significativamente na capacidade de absorção dos corpos de prova do traço 15 MPa, mas sim na capacidade de absorção dos corpos de prova do traço 30 MPa.

INFLUÊNCIA DO TIPO DE CONCRETO.

A resistência do concreto não se mostrou um fator de influência nos resultados obtidos durante os testes de potencial de corrosão, potencial do par e corrente galvânica em ambos blocos, porém, influenciou na variação do teor de umidade.

Os teores de umidade dos corpos de prova de ambos os blocos foram estatisticamente equivalentes durante três ciclos no começo do experimento. Nos cinco ciclos restantes não foram estatisticamente equivalentes. Portanto, a resistência do concreto influenciou na variação do teor de umidade em ambos os blocos.

7.2. INTERPRETAÇÃO GERAL

Com o experimento desenvolvido, considera-se que os parâmetros E_{corr} , E_{par} e I_{gal} se comportam de modo diferente em termos de uso como parâmetros de monitoramento da corrosão no sensor que foi projetado e testado neste trabalho de pesquisa. A Tabela 19 resume a experiência que foi produzida.

Tabela 11: Conclusão final sobre os parâmetros monitorados para detectar a corrosão.

Parâmetro	Teste em solução aquosa		Teste no concreto	
E_{corr}	Não testado.	×	Bom resultado para detectar a corrosão.	😊
E_{par}	Bom resultado para detectar a corrosão	😊	Difícil interpretação. Função do meio ambiente específico do concreto.	😞
I_{gal}	Inércia elevada para detectar corrosão.	😞	Inércia elevada para detectar corrosão.	😞

Fonte: Autor (2018)

Dessa forma, para atender ao objetivo principal da pesquisa, são necessários outros trabalhos. Nos quais deverão ser considerados os seguintes aspectos.

7.3 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Com este trabalho de dissertação, recomenda-se considerar alguns aspectos em trabalhos futuros, de modo a complementar algumas dúvidas que surgiram no momento de interpretar os resultados, tais como:

- Já que a estabilidade do potencial do par depende do meio ambiente específico do concreto, em estudos posteriores é preciso acompanhar o comportamento do potencial do par e do potencial

de corrosão em um meio livre de agentes agressivos até que o potencial do sensor se estabilize em um valor positivo, porém, menor do que 20 mV/min. baseado nos resultados observados neste trabalho.

- Pelo mesmo motivo se faz necessário controlar a temperatura no interior dos corpos de prova, assim como a resistividade do concreto, para avaliar a influência desses parâmetros no potencial galvânico.
- Recomenda-se também instalar um eletrodo de referência no interior do concreto junto com o sensor galvânico. Esta prática possibilitará determinar de forma separada o potencial do ânodo e do cátodo e assim poder determinar a curva de polarização de cada eletrodo.
- Também recomenda-se considerar um metal mais nobre do que o cobre para atuar como cátodo.

ATIVIDADE NA ESCRITA DE ARTIGOS.

O fenômeno de corrosão do aço de reforço das estruturas de concreto armado é um dos processos patológicos mais polêmicos e estudados. O monitoramento deste fenômeno envolve várias técnicas eletroquímicas assim como ensaios semi ou não destrutivo. Pelo que se trata de uma área de estudo ampla dentro da Construção Civil. Seguidamente são citados os artigos que tem sido desenvolvido como parte desta pesquisa em específico ou sobre temas intimamente relacionados.

“Efeito do grau de hidratação e de saturação do concreto nas leituras de resistividade elétrica”. Autores: Isaac Aguiar Oliveira, Fernanda Gadler, Analiet Calvo Valdés, Marcelo Henrique Farias de Medeiros. (2^o Simpósio Paranaense de Patologia das Construções (**SPPC**). Revista **CREA**. Publicado)

“Sensores de corrosão para monitoramento de pontes de concreto armado-Testes iniciais”. Autores: Analiet Calvo Valdés, Polyana de Jesus Roque e M. H. F. Medeiros. (2^o Simpósio Paranaense de Patologia das Construções (**SPPC**), Revista **CREA**. Publicado)

“Sensores de corrosão para monitoramento de pontes e viadutos de concreto armado. Primeira etapa: Ensaios de laboratório com sensores submersos em uma solução saturada de hidróxido de cálcio com e sem contaminação”. Autores: Analiet Calvo Valdés, Polyana de Jesus Roque e M. H. F. Medeiros. (Conferência Nacional de Patologia e Recuperação Estrutural – **CONPAR** 2017. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada – **REPA** (2017). Publicado)

“Monitoramento do tempo de iniciação da corrosão por cloretos através de sensores galvânicos: Estado da arte”. Autores: Analiet Calvo Valdés, Polyana

de Jesus Roque e M. H. F. Medeiros. (Conferência Nacional de Patologia e Recuperação Estrutural – **CONPAR** 2017. Publicado).

“Proposição de sensor galvânico de corrosão para monitoramento de pontes e viadutos de concreto armado”. Autores: Analiet Calvo Valdés, Polyana de Jesus Roque e M. H. F. Medeiros. (Congresso Brasileiro de Patologia das Construções – **CBPAT** 2018).

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, P. A de O; NETO, G. N de A; FIGUEIREDO, E.P. Capítulo 35: Monitoração de estruturas de concreto. In: **Concreto: Ciência e tecnologia**. v II. p 1232-1281. 2011
- SANTOS, L. O. Monitoramento e ensaio de pontes. In: Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. Rio de Janeiro. **Anais**. p 1-14. 21-23 de Maio del 2014
- MADRID, M.M; LÓPEZ, T.P.; MORENO, A del V. El fenomeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Publicación técnica No.182. Secretaria de comunicaciones y transporte. Instituto mexicano del transporte. p 1-88. 2001
- ORTIZ, A.; MALDONADO, E.; BORUNDA, A.; NIEVES, D.; ALMERAYA, F.; BALTAZAR, M. Corrosion del acero inoxidable 304 como refuerzo en concreto expuesto a cloruros y sulfatos. Revista **Scientia et Technica Ano XIII**, No 36. Universidad Tecnologica de Pereira. ISSN 0122-1701. p 1-5. Septiembre de 2007
- ANDRADE, CARMEN; FIGUEIRAS, HELENA; FÉLIX, CARLOS; SOUSA. COUTINHO, JOANA. Desempenho do kit-sensor de corrosão na monitorização da durabilidade de estruturas de betão. In: BE2008 – Encontro Nacional Betão Estrutural 2008. Guimarães. **Anais**. 5, 6, 7 de novembro de 2008
- RAUPACH M.; SCHIESSL P. Macrocell sensor systems for monitoring of the corrosion risk of the reinforcement in concrete structures. Revista **NDT & E INTERNATIONAL**, 34(6), pp. 435-442. 2001
- PAWLICK, L.A.; STONER, GLEN E.; CLEMENÑA, GERARDO G. Development of an embeddable reference electrode for reinforced concrete structures. **Virginia transportation research council**. 1998.
- FORCE TECHNOLOGY. Catalogue for Products related to Corrosion Monitoring in Concrete, 2012.
- CAETANO, L.F.; QUININO, U. C. de M.; STRIEDER, A.J.; CAMPAGNOLO, J.L.; LORENZI, A.; SILVA FILHO, L.C.P. Estudos de caso sobre avaliação de estruturas de concretos através da utilização de ensaios não destrutivos. Revista **ALCONPAT**. v 1. p 188-200. Setembro-Dizembro 2011
- CEDRIM F. A.; V. L. S. ALMEIDA; C. A. C. SOUZA; M. D. JESUS; D. V. RIBEIRO; Efeito da eletrodeposição de zinco e da liga zinco-níquel na corrosibilidade das armaduras de concreto armado. Revista **IBRACON** de estruturas e materiais. Volume 9, Número 4, p. 595 – 616, ISSN 1983-4195. Agosto, 2016.
- XI, XUN; YANG, SHANGTONG. Time to surface cracking and crack width of reinforced concrete structures under corrosion of multiple rebars. Revista **Construction and Building Materials**, v 155, p 114–125, (2017).

LI, C. Q.; YANG, S. T. Prediction of Concrete Crack Width under Combined Reinforcement Corrosion and Applied Load. Revista **Journal of Engineering Mechanics**, v 137(11), p 722-731. November, 2011.

RODAGEM, DER/PR. Programa de concessão rodoviária do estado do k. Paraná. 2012

BÄSSLER, R.; PORTELLA, P.D.; PANOSSIAN, Z.; ARAUJO, A. Monitoramento da corrosão em estruturas de concreto: sensor galvânico. PINI Revista. **Téchne**. Edition 194. p 1-3. Maio 2013.

SNIC, Sindicato Nacional da indústria do cimento. Resultados Preliminares de Dezembro de 2015.

HOLLAND, M. Bridge-Monitoring Technology Plays Critical Role Following BargeCrash.Disponível em:<http://corrdefense.nace.org/corrdefense_summer_2011/project_news2.as>. Acesso: 2011.

NERY, G. Boletim Técnico: Monitoração na construção civil B5. Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción. **ALCONPAT**. p 1-18. 2013

U.S. Fire Administratioin / Minesota. I-35W Mississippi River bridge explained <http://everything.explained.today/I-35W_Mississippi_River_bridge/>Acesso: 2007

ZOGHI, M. The International Handbook of FRP COMPOSITES IN CIVIL ENGINEERING.By CRC Press. Disponível em: < <https://www.crcpress.com/The-International-Handbook-of-FRP-Composites-in-Civil-Engineering/Zoghi/p/book/9780849320132>>. Acesso: Setembro, 2013.

IPEA, **Instituto de pesquisa econômica aplicada**. Infraestrutura Econômica no Brasil: diagnósticos e perspectivas para 2025. V 1. P 1-581. 2010

BÄSSLER, R.; PORTELLA, P.D.; PANOSSIAN, Z.; ARAÚJO, A.; Monitoramento da corrosão em estruturas de concreto: sensor de umidade, de taxa de corrosão e de fibra óptica. Revista PINI. **Téchne**. Edition 195. P 1-2. Junho 2013.

MEDEIROS, M. H. F. DE; GIORDANO, D. E.; PEREIRA, E.; VIGNOLIO, A.; GALEANO, R.; HELENE, Paulo. Inspeção no Palácio de la luz - Montevideo: uma visão de durabilidade. Revista **ALCONPAT**, v. 2, p. 93-103, 2012.

MEDEIROS JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G.; MEDEIROS, M. H. F. Service life of concrete structures considering the effects of temperature and relative humidity on chloride transport. Revista **Environment, Development and Sustainability**, v. 1, p. 1-12, 2014.

MEDEIROS JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G.; YAZIGI, R.; MEDEIROS, M. H. F. Carbonation depth in 57 years old concrete structures. Revista **Steel and Composite Structures**, v. 19, p. 953-966, 2015.

DNIT 010/2004-PRO “Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido – Procedimento”.

FHA, **Federal Highway Administration**. Bridge preservation guide. August 2011.

HOOKS, J. M.; VARMA, S.; PROCTOR, G. D. Proceedings of the National Bridge Management. In: Inspection and Preservation Conference. St. Louis, Mo. **Report**. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration (FHWA). 01-02 November del 2011.

MARSHALL, A. R.; ALLEC, P.; SODEN, D.; DONNELL, L. O.; CASEY, W.; JOHNSON, M. B. *Manual for Bridge Element Inspection*. 2013.

INAUDI, D. Integrated Structural Health Monitoring Systems for Bridges. ASCP'09. In: 1º Congresso de Segurança e Conservação de Pontes ASCP. Lisboa. **Anais**. 2009.

ARAÚJO, A. Monitoramento da corrosão em estruturas de concreto. PINI Revistas. **Infraestrutura urbana. projetos, custos e construção**. Edition 28, p 1-2. Julho 2013

TORRES-LUQUE M.; E. BASTIDAS-ARTEAGA, F. SCHOEFS; M. SÁNCHEZ-SILVA; J.F. OSMA. Non-destructive methods for measuring chloride ingress into concrete: State-of-the-art and future challenges. Revista **Construction and Building Materials**. 2014.

DHAWAN, SUSHIL; BHALLA, SURESH; B. BHATTACHARJEE. Reinforcement Corrosion in Concrete Structures and Service Life Predictions – A Review. In: 9th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, New Delhi, India. **Anais**. 1-6 November, 2014.

PORTELLA B. MARIANA D'OREY GAIVÃO. **Avaliação e monitoramento dos mecanismos de deterioração do Concreto exposto aos íons cloreto e sulfato e o efeito da Adição de nano-Fe₃O₄ por espectroscopia de impedância Eletroquímica**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

NIMMO, BILL; HINDS, GARETH. “Beginners Guide to Corrosion”. **NPL**, p 1 of 10. February 2003.

MAIA, LINO e ALVES, SÉRGIO. Low durability of concrete elements due to steel corrosion – cases where in the steel reinforcing bars acted as an internal clock bomb. In: 2nd International Conference on Structural Integrity - ICSI. Funchal,

Madeira, Portugal. **Procedia Structural Integrity** 5, p 139–146. 4 - 7 September 2017.

HELENE, P. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese (Livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

GLASS, G.K.; BUENFELD, N.R. The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. Original Research Article. **Corrosion Science**, Volume 39, Issue 5, Pages 1001-1013. May 1997.

GLEITER, H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. **Acta mater**. V 48. p 1-29. 2000.

EL-REEDY, MOHAMED A. Steel Reinforced Concrete Structures: assessment and repair of corrosion. CRC Press. By **Taylor & Francis Group**, LLC. 2008.

JIN, MING; JIANG, LINHUA; ZHU, QIAO. Monitoring chloride ion penetration in concrete with different mineral admixtures based on embedded chloride ion selective electrodes. **Construction Building Materials**. Volume 143. Páginas 1-5. 15 julho, 2017.

CASCUDO, OSWALDO. Capítulo 2: “Corrosão de armaduras em concreto” página 39-61. Capítulo 8: “Potenciais de corrosão” In: **O controle da corrosão de armaduras em concreto. Inspeção e técnicas eletroquímicas**, p 137-153. Primeira versão 1997.

SILVA, PEDRO NETO ROBERTO. Ataque em estruturas de concreto por ação de cloretos. 11 de Dezembro, 2016.

ABNT NBR 12655: “Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento”, 2006.

MORRIS, W.; VICO, A.; VÁZQUEZ, M. Chloride induced corrosion of reinforcing steel evaluated by concrete resistivity measurements. **Electrochimica Acta**. Volume 49. Issue 25, p 4447-4453. 1 October 2004.

FIGUEIREDO, ENIO J. PAZINI; MEIRA, GIBSON ROCHA. Boletim Técnico: Corrosão das armaduras de concreto. Associação Latinoamericana de Controle da qualidade, Patologia e Recuperação da Construção. **ALCONPAT**, 2013.

ROMANO, PEDRO; BRITO, PAULO S.D.; RODRIGUES, LUIZ. Monitoring of the degradation of concrete structures in environments containing chloride ions. **Construction and Building Materials**. V 47, p 827–832. 2013.

BENTZ, D.P.; JENSEN, O.M.; COATS, A.M.; GLASSER, F.P. “Influence of silica fume on diffusivity in cement-based materials. I. Experimental and computer modeling studies on cement pastes”. **Cement and Concrete Research**, v 30, p 953 – 962. 2000.

ROCHA, F. C. **Leituras de potencial de corrosão em estruturas de concreto armado: influência da relação água / cimento, da temperatura, da contaminação por cloretos, da espessura de cobrimento e do teor de umidade do concreto**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em engenharia de construção civil – PPGECC. Universidade Federal do Paraná. Curitiba 2012

ASTMA C876 – 15. “Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete”. Edição atual aprovada em 1 de novembro de 2015. Publicado em abril de 2016. Originalmente aprovado em 1977. Última edição anterior aprovada em 2009 como C876-09. DOI: 10.1520 / C0876-15

DOTTO, J. M. R. **Corrosão do aço induzida por íons cloreto – uma análise crítica das técnicas eletroquímicas aplicadas ao sistema aço-concreto com ou sem pozolana**. Dissertação (Doutorado). Escola de Engenharia. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM. Universidade federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre 2006.

SILVA, E. P. **Avaliação do potencial de corrosão de concretos estruturais produzidos segundo as prescrições da NBR 6118, submetido a ensaio de corrosão acelerado**. Dissertação (Graduação) -Curso de Engenharia Estrutural e Construção Civil de Fortaleza. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza 2010.

TRANSPORTE. Secretaria de comunicaciones y transportes instituto mexicano del transporte. Protección catódica de concreto reforzado usando ánodos de sacrificio discretos. Publicacion técnica 290. 2006

JOUKOSKI, A. **Estudo do desempenho de concretos para artefatos de redes de distribuição de energia elétrica destinadas a ambientes litorâneos**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em engenharia de construção civil – PPGECC. Universidade Federal do Paraná. Curitiba 2003.

MCCARTER, W. JOHN; VENNESLAND, ØYSTEIN. Sensor systems for use in reinforced concrete structures. **Construction and Building Materials**, v 18, p 351–358. (2004).

ARAÚJO, ADRIANA D.; PANOSSIAN, ZEHBOR; PORTELLA, PEDRO D.; BÄSSLER, RALPH. Monitoramento da corrosão em estruturas de concreto: sensor galvânico. <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/194/artigo294083-1.aspx>. Edição 194. Maio/2013

RIBEIRO, VÉRAS. DANIEL.; CUNHA, TEIXEIRA. MANUEL PAULO. Capítulo 8: “Técnicas de avaliação e monitoramento da corrosão em estruturas de concreto armado”. In: **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado**. página 215. 2014.

CESEN, ALEŠ; KOSEC, TADEJA; LEGAT, ANDRAZ. Characterization of steel corrosion in mortar by various electrochemical and physical techniques. **Corrosion Science**, v 75, p 47–57. 2013.

LACERDA, M. D. MARIANNA; MÜLLER RENATA. Uso de sensor de taxa de corrosão instantânea como técnica de monitoramento da corrosão em estruturas de concreto. **Obra24horas**. Entrada em: 17/11/2015. Disponível em: <<http://www.obra24horas.com.br/artigos/concreto/uso-do-sensor-de-taxa-de-corrosao-instatanea-como-tecnica-de-monitoramento-da-corrosao-em-estruturas-de-concreto>>. Acesso em: janeiro / 2017

PEREIRA, ELSA V.; FIGUEIRA, RITA B.; SALTA, MARIA MANUELA L.; FONSECA, INÊS TEODORA ELIAS D. A Galvanic Sensor for Monitoring the Corrosion Condition of the Concrete Reinforcing Steel: Relationship Between the Galvanic and the Corrosion Currents. **Journal of Sensor**. n 9. p 8391-8398. 2009. Disponível em: <www.mdpi.com/journal/sensors>. DOI:10.3390/s91108391; ISSN 1424-8220. 2009

PARK, ZIN-TAEK; CHOI, YOON-SEOK; KIM, JUNG-GU; CHUNG, LAN. Development of a galvanic sensor system for detecting the corrosion damage of the steel embedded in concrete structure. Part 1. Laboratory tests to correlate galvanic current with actual damage. **Cement and Concrete Research**, v 33, p 2057 – 2062, 2003.

PARK, ZIN-TAEK; CHOI, YOON-SEOK; KIM, JUNG-GU; CHUNG, LAN. Development of a galvanic sensor system for detecting the corrosion damage of the steel embedded in concrete structure. Part 2. Laboratory electrochemical testing of sensors in concrete. **Cement and Concrete Research**, v 35, p 1814 – 1819 (2005).

PEREIRA, ELSA V.; SALTA, M. MANUELA. Monitorização permanente da corrosão em estruturas de betão armado. Resultados a longo prazo. In: Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2012. **Anais**. FEUP, 24-26 de outubro de 2012

ANDRADE, C.; Ø. VENNESLAND; M. RAUPACH. Recommendation of Rilem TC 154-EMC: “Electrochemical techniques for measuring corrosion in concrete”—measurements with embedded probes. **Materials and Structures**, v 40, p 745–758. 2007.

HUAFU PEI, ZONGJIN LI, JINRUI ZHANG, QIAN WANG. Performance investigations of reinforced magnesium phosphate concrete beams under accelerated corrosion conditions by multi techniques. **Construction Building Materials**, v 93, p 982-994. 2015.

VIM, Vocabulário internacional de metrologia. Conceitos fundamentais e gerais e termos associados. 1^{era} edição Luso-Brasileira. p 1-95. 2012

KLASSEN, R.D.; ROBERGE, P.R. Capítulo 5: Zero resistance ammetry and galvanic sensor. In: **Technique for corrosion monitoring**, p 111-124. 2008

ANGST, U. AND BUCHLER, M. On the applicability of the Stern–Geary relationship to determine instantaneous corrosion rates in macro-cell corrosion. **Materials and Corrosion**, v 66, No. 10. 2015.

MACCARTER W. JOHN; VENNESLAND, ØYSTEIN. Sensor systems for use in reinforced concrete structures. **Construction and Building Materials**, v 18(6), p 351-358. 2004.

SOUSA, CALDAS D. CARLOS ALBERTO. Capítulo 2: Princípios da corrosão eletroquímica. In: **Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**, p 13-34. 2014.

FERNANDES, KETTERMANN. VIVIANE; MARTENDA, PEREIRA. CAROLINE. L. Por que os metais sofrem corrosão? **Engenheiro de Materiais**. Entrada em: 18 de novembro 2015. Disponível em:
<<http://engenheirodemateriais.com.br/tag/pilha-galvanica/>>

MEHTA, P. KUMAR; MONTEIRO, PAULO J. M. Capítulo 5: Durability. Concrete in the Marine Enviroment. In: **Concrete. Microstruture, Properties and Materials**. Third Edition. By: McGraw-Hill. DOI: 10.1036/0071462899, p 186. 2006.

NBR 6118: 2015. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. ABNT

NBR 5738: 2003. Concreto-Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova. ABNT

NBR NM 7223: 1992. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. ABNT

NBR NM 67: 1998. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. ABNT

NBR 12655:2006. Concreto de cimento Portland–Preparo controle e recebimento – Procedimento.

NBR-NM- 248: 2003. Agregados-Determinação da composição granulométrica. ABNT

NBR 7211:2009. Agregados para concreto- Especificação. ABNT

FERREIRA, RUI MIGUEL. **Probability-based durability analysis of concrete structures in marine environment**. University of Minho School of Engineering Departament of Civil Engineering. Guimarães,2004

ABNT NBR 15577-4. Agregados – Reatividade álcalis- agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. 2009.

OLIVEIRA, ANTÔNIO ROBERTO D. Corrosão e Tratamento de Superfície. Editora rede e-TEC Brasil. Instituto federal de educação, ciência e tecnologia. Campus Belém. 2012.

NAPPI, LALANE, MANEULA MARQUES; NAPPI, BRANCO, SÉRGIO CASTELLO; VALLE, ÂNGELA. Corrosão na interface metal / madeira-análise de elementos metálicos embutidos em diferentes espécies de madeira. In: IX Congresso Internacional sobre Patología e Recuperação de Estruturas-CINPAR. **Anais**. João Pessoa -PB (Brasil), 2 a 5 de junho de 2013.

NBR 5738:2003. Concreto - Procedimento para Moldagem e cura de corpos-de-prova.

FREIRE, K. R. R. **Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em engenharia de construção civil – PPGECC. Universidade Federal do Paraná. Curitiba 2005.

LIMA, MARYANGELA G.; MORELLI, FABIANO. **Caracterização da agressividade do ambiente marinho às estruturas de concreto**. Disponível em: <http://www.semengo.furg.br/2004/07_2004.pdf>, p 1-20. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica - ITA, São José dos Campos, SP. 2004.

EC-LAB. **Software: Techniques and Applications**. Version 10.1x. Fevereiro, 2011. BioLogic Science Instruments.

DUARTE, LAUREN DA CUNHA; PEDRO LUIZ JUCHEM; GÊNOVA MARIA PULZ; TÂNIA MARA MARTINI DE BRUM; NELSON CHODUR; ANTÔNIO LICCARDO; ADRIANE COMIN FISCHER & ROBERTA BONATTO ACAUAN. Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no Estudo de Gemas: exemplos brasileiros. **Pesquisas em Geociências**, v 30(2), p 3-15. ISSN 1518-2398. 2003.

MARTINEZ ORELLANA, ADOLFO. Microanálisis por dispersión de energías de rayos-X (XEDS). Conceptos básicos. Servicio de Microscopía Electrónica (SCAI). Universidad de Málaga (UMA). Disponível em: <<http://www.uma.es/sme/nueva/Documentos/EDXS.pdf>>_Acesso em: dezembro de 2017. 2010.

NBR 9779:1995. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade.

REAL L. V.; OLIVEIRA D. R. B.; SOARES T.; MEDEIROS M. H. F. Método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata para avaliação da penetração de cloretos em concreto: estado da arte. Revista **ALCONPAT**, v 5. No. 2, p 149 – 159. Mayo - Agosto 2015.

FRANÇA, CLÉRIO BEZERRA. **Avaliação de cloretos livres em concretos pelo método de aspersão de solução de nitrato de prata**. Universidade Católica de Pernambuco. Pró -Reitoria Acadêmica- PRAC. Programa de pós-graduação em Engenharia de Construção Civil. Mestrado em Engenharia Civil. 2011.

MEDEIROS, MARCELO HENRIQUE FARIAS. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente a ação de íons cloretos**. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. 2008

MARCONDES, CARLOS GUSTAVO NASTARI. **Adição de nanotubos de carbono em concretos de cimento Portland absorção, permeabilidade, penetração de cloretos e propriedades mecânicas**. Universidade Federal do Paraná. Setor de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil – PPGECC. 2012.

JUCÁ, TATIANA RENATA PEREIRA. **Avaliação de Cloretos Livres em Concretos e Argamassas de Cimento Portland pelo Método de Aspersão de Nitrato de Prata**. Universidade Federal de Goiás. Escola Engenharia Civil II. 2002.

SOUZA, LÍRIA ALVES D. Classificação das Bases. Brasil Escola. Disponível em: <<http://brasilecola.uol.com.br/quimica/classificacao-das-bases.htm>>. Acesso em: 13 de fevereiro de 2018.

MEIRA, GIBSON ROCHA. Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: fundamentos, diagnóstico e prevenção. Editora IFPB. Instituto Federal de Paraíba. 2017.

BRANDÃO, A. M. S.; PINHEIRO, L. M. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado: aspectos relativos ao projeto**. Cadernos de Engenharia de Estruturas. n.8. EESC. Universidade de São Paulo. São Carlos. 1999

MANCIO, G. KUSINSKI, T.M. DEVINE, P.J.M. MONTEIRO. Electrochemical and in-situ SERS study of passive film characteristics and corrosion performance of microcomposite steel in simulated concrete pore solutions. **Journal of ASTM International (Online)**, v. 6, p. 101903, 2009

MEDEIROS FARIAS, MARCELO HENRIQUE; ANDRADE OLIVEIRA, JAIRO JOSÉ D.; e HELENE, PAULO. Capítulo 22: Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. IBRACON, 2011.

B. ELSENER e A. ROSSI. Passivation of Steel and Stainless Steel in Alkaline Media Simulating Concrete. In: **Reference Module in Chemistry. Molecular Sciences and Chemical Engineering**. DOI10.1016/B978-0-12-409547-2.13772-2. January, 2017.

SILVA, LEANDRO MELO ANDRADE. **Resistividade elétrica superficial do concreto: influência da cura**. Universidade Federal de Goiás. Escola de engenharia civil e ambiental. Curso de graduação em engenharia civil. 2016.

ANEXOS

ANEXO A. RESULTADOS DO ENSAIO MEV E EDS
A.1. SENSOR A.

A Figura 1A mostra a região da Barra 1 do Sensor A que foi amplificada no MEV e onde posteriormente foi escolhido um ponto para analisar por meio do EDS. Também mostram as imagens obtidas em um Microscópio óptico.

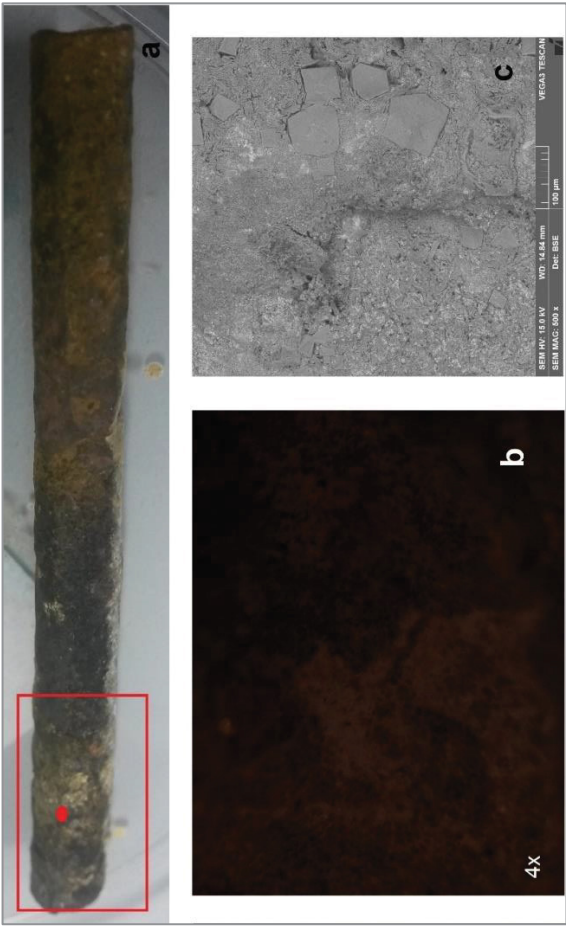


Figura 1A: Região escolhida para análise da Barra 1 do Sensor A. (a) Barra analisada; (b) Imagem obtida no microscópio óptico e (c) Imagem obtida no MEV.

A Figura 2A mostra o espectro obtido na área analisada na primeira barra estudada do Sensor A, onde σ representa a probabilidade de interação entre o feixe de elétrons e a amostra. A Tabela 1A mostra as concentrações

aparentes dos elementos químicos que mostra o espectro da Barra 1 do Sensor A.

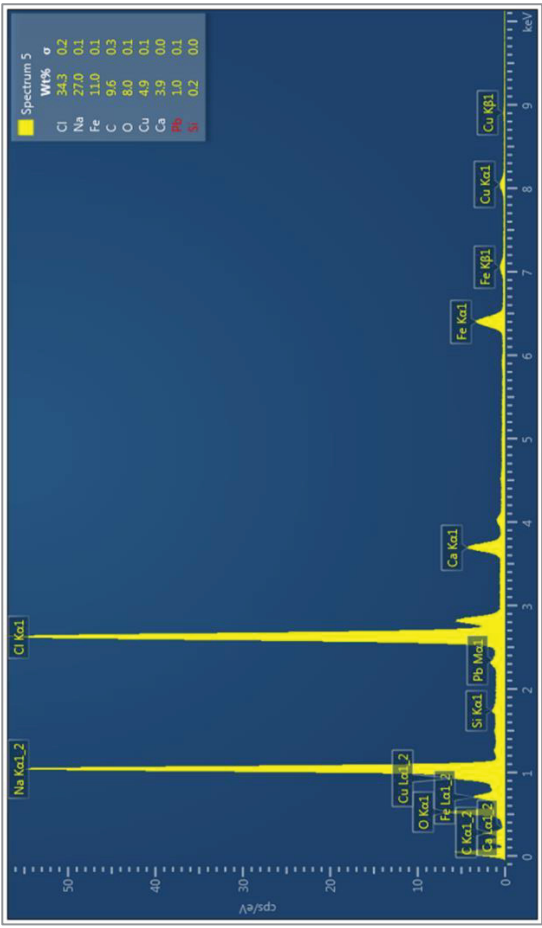


Figura 2A: Espectro dos elementos químicos na área analisada da Barra 1 do Sensor A.

Tabela 1A: Concentrações aparentes dos elementos químicos que mostra o espectro da Barra 1 do Sensor A.

Elemento	Wt%	Nome padrão
C	9.60	C Vit
O	8.01	SiO ₂
Na	27.05	Albite
Si	0.17	SiO ₂
Cl	34.28	NaCl
Ca	3.93	Wollastonite
Fe	11.04	Fe
Cu	4.90	Cu
Pb	1.01	PbTe

A Figura 3A mostra a região da Barra 2 que foi amplificada no MEV e posteriormente analisada por médio de EDS. A Figura 4A mostra o espectro obtido na área analisada na segunda barra estudada do Sensor A. A Tabela 2A mostra as concentrações aparentes dos elementos químicos que mostra o espectro da Barra 2 do Sensor A.

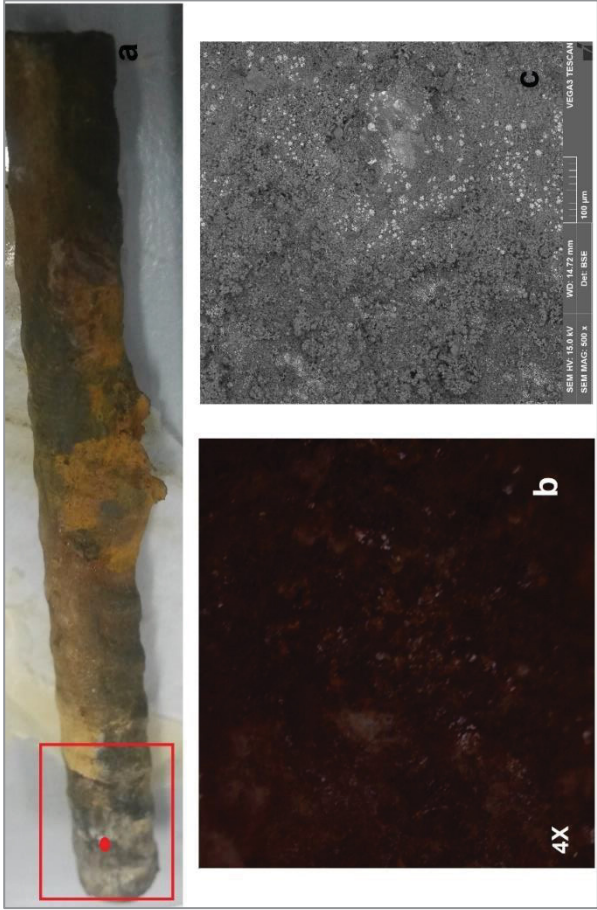


Figura 3A: Região escolhida para análise da Barra 2 do Sensor A. (a) Barra analisada; (b) Imagem obtida no microscópio óptico e (c) Imagem obtida no MEV.

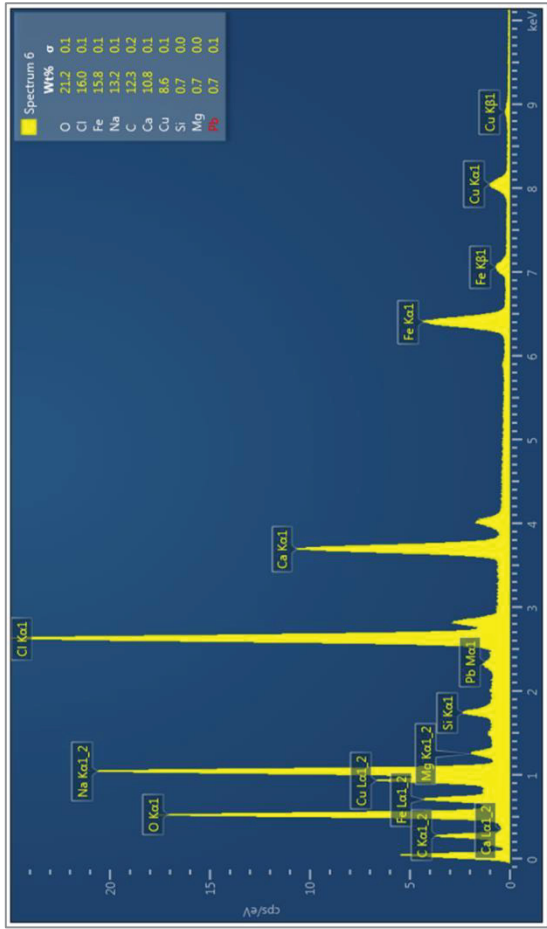


Figura 4A: Espectro dos elementos químicos na área analisada da Barra 2 do Sensor A.

Tabela 2A: Concentrações aparentes dos elementos químicos que mostra o espectro da Barra 2 do Sensor A.

Elemento	Wt%	Nome estándar
C	12.29	C Vit
O	21.25	SiO ₂
Na	13.22	Albite
Mg	0.69	MgO
Si	0.72	SiO ₂
Cl	15.97	NaCl
Ca	10.77	Wollastonite
Fe	15.81	Fe
Cu	8.62	Cu
Pb	0.67	PbTe

A Figura 7A mostra a região da Barra 4 que foi amplificada no MEV e posteriormente analisada por médio de EDS. A Figura 8A mostra o espectro obtido na área analisada na segunda barra estudada do Sensor A. A Tabela 4A mostra as concentrações aparentes dos elementos químicos que mostra o espectro da Barra 4 do Sensor A.



Figura 7A: Região escolhida para análise da Barra 4 do Sensor A. (a) Barra analisada; (b) Imagem obtida no microscópio óptico e (c) Imagem obtida no MEV.

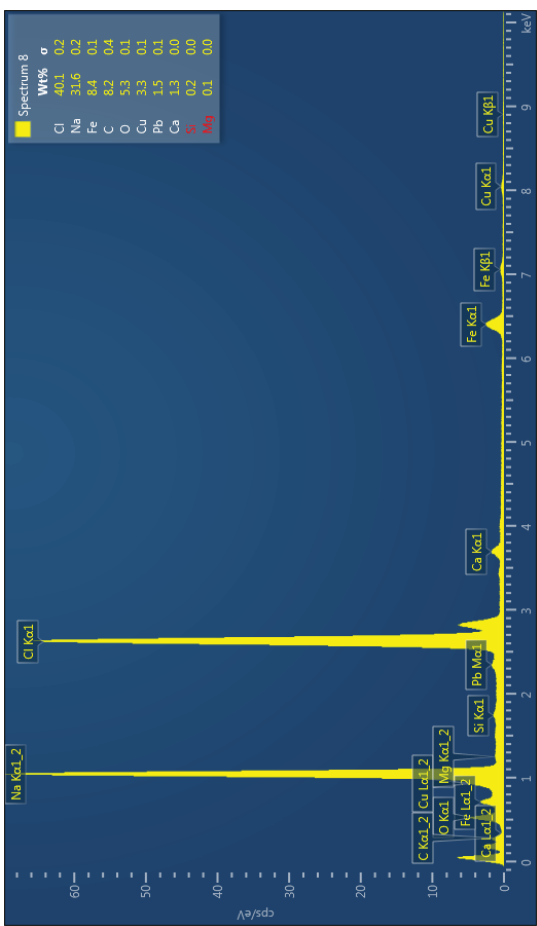


Figura 8A: Espectro dos elementos químicos na área analisada da Barra 4 do Sensor A.

Tabela 4A: Concentrações aparentes dos elementos químicos que mostra o espectro da Barra 4 do Sensor A.

Elemento	Wt%	Nome padrão
C	8.18	C Vit
O	5.33	SiO ₂
Na	31.57	Albite
Mg	0.06	MgO
Si	0.16	SiO ₂
Cl	40.13	NaCl
Ca	1.32	Wollastonite
Fe	8.44	Fe
Cu	3.32	Cu
Pb	1.49	PbTe

A.2. SENSOR B

A Figura 9A mostra a região da Barra 1 que foi amplificada no MEV e posteriormente analisada por médio de EDS. A Figura 10A mostra o espectro obtido na área analisada na primeira barra estudada do Sensor B. A Tabela 5A mostra as concentrações aparentes dos elementos químicos que mostra o espectro da Barra 1 do Sensor B.

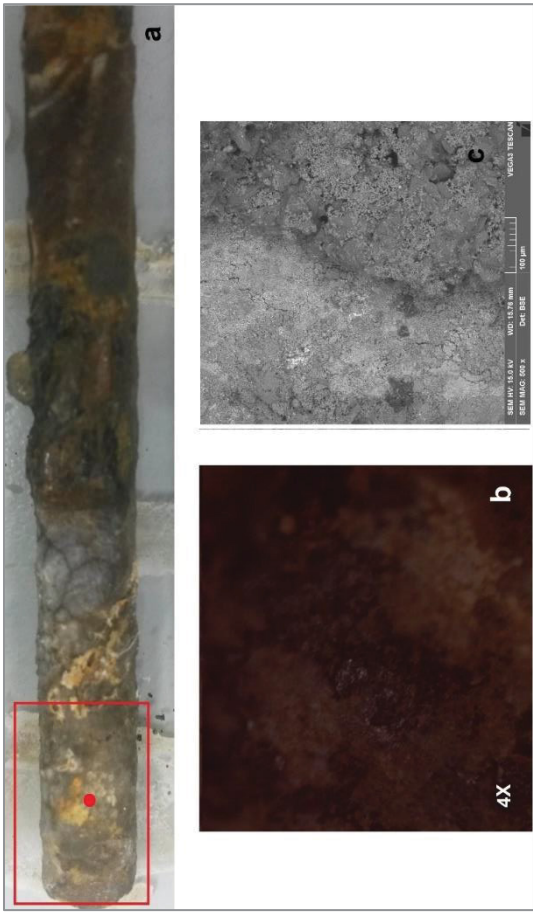


Figura 9A: Região escolhida para análise da Barra 1 do Sensor B. (a) Barra analisada; (b) Imagem obtida no microscópio óptico e (c) Imagem obtida no MEV.

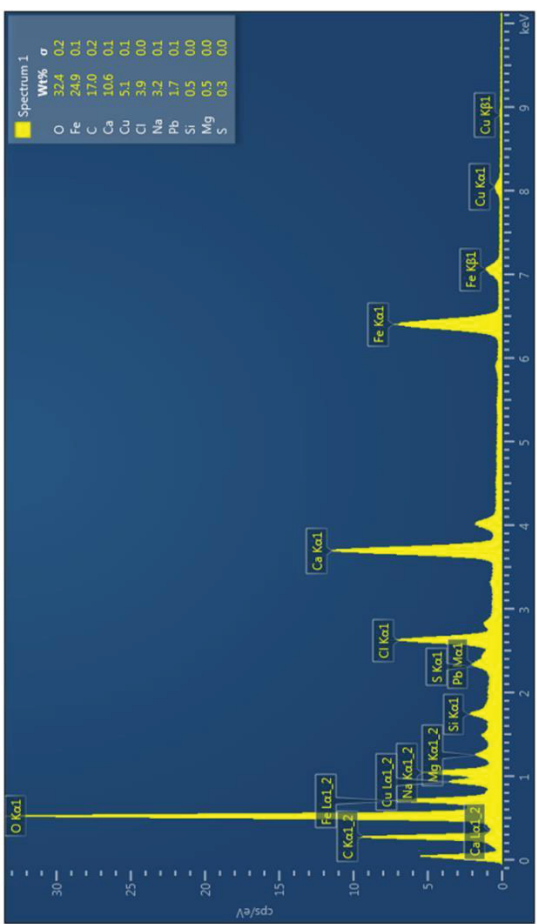


Figura 10A: Espectro dos elementos químicos na área analisada da Barra 1 do Sensor B.

Tabela 5A: Concentrações aparentes dos elementos químicos que mostra o espectro da Barra 1 do Sensor B.

Elemento	Wt%	Nome estándar
C	16.98	C Vit
O	32.37	SiO ₂
Na	3.15	Albite
Mg	0.49	MgO
Si	0.55	SiO ₂
S	0.26	FeS ₂
Cl	3.88	NaCl
Ca	10.59	Wollastonite
Fe	24.91	Fe
Cu	5.07	Cu
Pb	1.75	PbTe

A Figura 11A mostra a região da Barra 2 que foi amplificada no MEV e posteriormente analisada por médio de EDS. A Figura 12A mostra o espectro obtido na área analisada na segunda barra estudada do Sensor B. A Tabela 6A mostra as concentrações aparentes dos elementos químicos que mostra o espectro da Barra 2 do Sensor B.

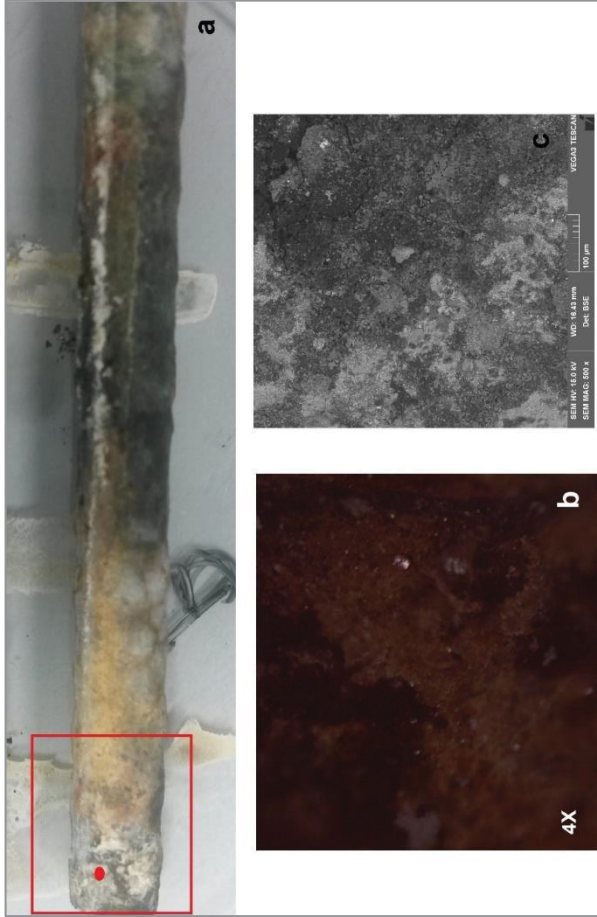


Figura 11A: Região escolhida para análise da Barra 2 do Sensor B. (a) Barra analisada; (b) Imagem obtida no microscópio óptico e (c) Imagem obtida no MEV.

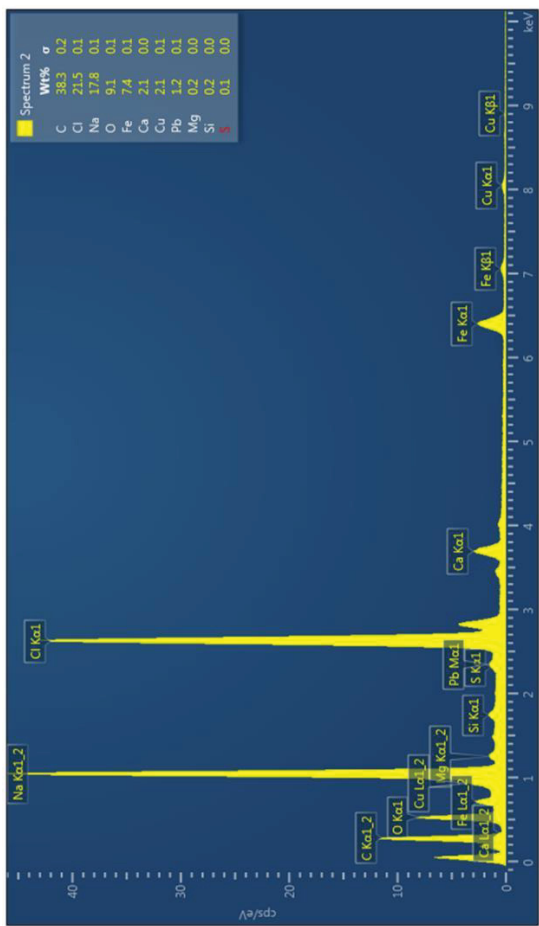


Figura 12A: Espectro dos elementos químicos na área analisada da Barra 2 do Sensor B.

Tabela 6A: Concentrações aparentes dos elementos químicos que mostra o espectro da Barra 2 do Sensor B.

Elemento	Wt%	Nome padrão
C	38.34	C Vit
O	9.13	SiO ₂
Na	17.77	Albite
Mg	0.25	MgO
Si	0.22	SiO ₂
S	0.06	FeS ₂
Cl	21.51	NaCl
Ca	2.12	Wollastonite
Fe	7.37	Fe
Cu	2.07	Cu
Pb	1.16	PbTe

A Figura 13A mostra a região da Barra 3 que foi amplificada no MEV e posteriormente analisada por médio de EDS. A Figura 14A mostra o espectro obtido na área analisada na terceira barra estudada do Sensor B. A Tabela 7A mostra as concentrações aparentes dos elementos químicos que mostra o espectro da Barra 3 do Sensor B.

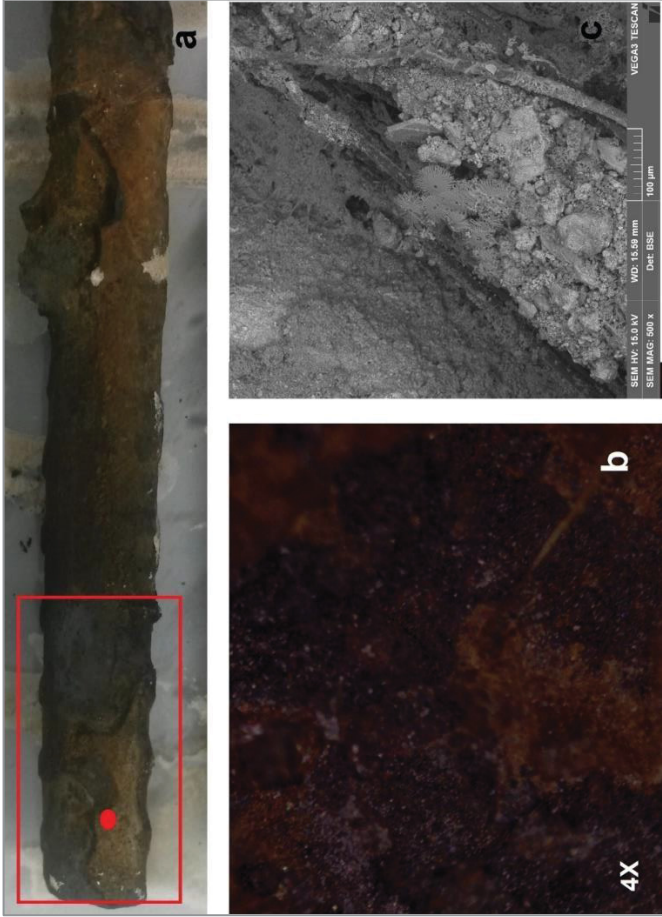


Figura 13A: Região escolhida para análise da Barra 3 do Sensor B. (a) Barra analisada; (b) Imagem obtida no microscópio óptico e (c) Imagem obtida no MEV.

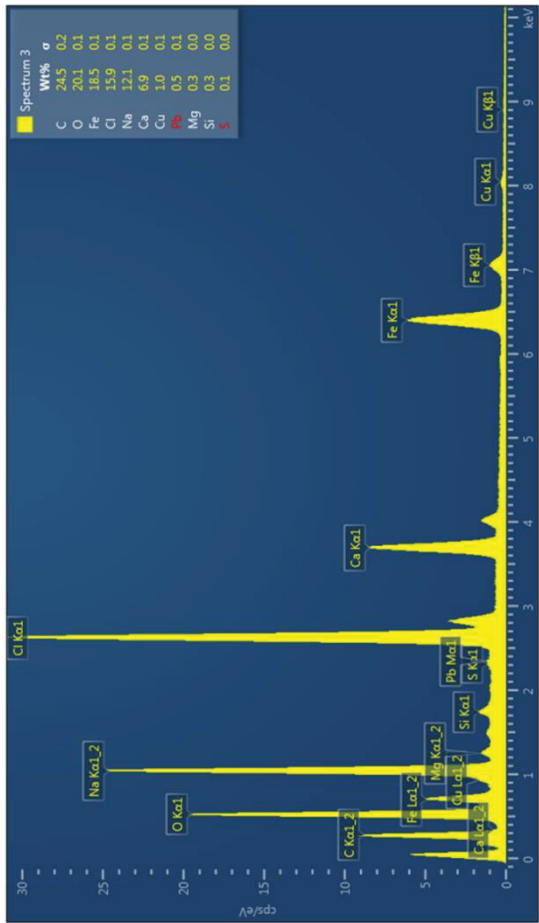


Figura 14A: Espectro dos elementos químicos na área analisada da Barra 3 do Sensor B.

Tabela 7A: Concentrações aparentes dos elementos químicos que mostra o espectro da Barra 3

Elemento	Wt%	Nome padrão
C	24.50	C Vit
O	20.10	SiO ₂
Na	12.06	Albite
Mg	0.28	MgO
Si	0.26	SiO ₂
S	0.06	FeS ₂
Cl	15.88	NaCl
Ca	6.85	Wollastonite
Fe	18.52	Fe
Cu	1.01	Cu
Pb	0.47	PbTe

A Figura 15A mostra a região da Barra 4 que foi amplificada no MEV e posteriormente analisada por médio de EDS. A Figura 16A mostra o espectro obtido na área analisada na quarta barra estudada do Sensor B. A Tabela 8A mostra as concentrações aparentes dos elementos químicos que mostra o espectro da Barra 4 do Sensor B.



Figura 15A: Região escolhida para análise da Barra 4 do Sensor B. (a) Barra analisada; (b) Imagem obtida no microscópio óptico e (c) Imagem obtida no MEV.

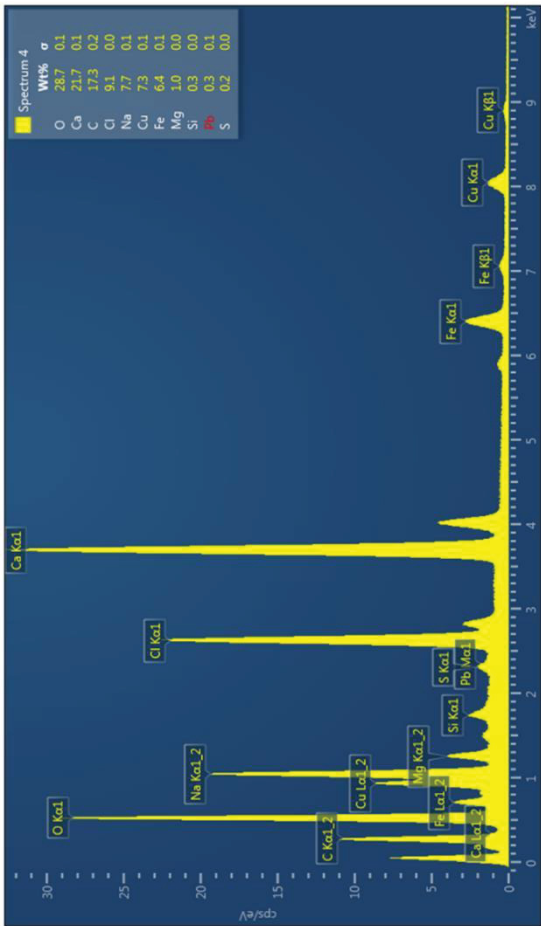


Figura 16A: Espectro dos elementos químicos na área analisada da Barra 4 do Sensor B.

Tabela 8A: Concentrações aparentes dos elementos químicos que mostra o espectro da Barra 4

Elemento	Wt%	Nome padrão
C	17.31	C Vit
O	28.69	SiO2
Na	7.66	Albite
Mg	1.01	MgO
Si	0.35	SiO2
S	0.23	FeS2
Cl	9.10	NaCl
Ca	21.72	Wollastonite
Fe	6.35	Fe
Cu	7.30	Cu
Pb	0.28	PbTe

ANEXO B. RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Tabela 1B: Resistência à compressão dos corpos de prova do traço de fck igual a 15 MPa com 2 d de idade. Fonte: Autor.

BLOCO I				TRAÇO		15 MPa
IDENTIFICAÇÃO	F		fci	fcm	Data de moldagem	
	[kg/f]	[N]	[MPa]	[MPa]	23/07/2017	
CP-I-15-B1	4000	39240	5,00	4,58	Data do ensaio	
CP-II-15-B1	3500	34335	4,37		25/07/2017	
CP-III-15-B1	3500	34335	4,37		IDADE: 2 d	

Tabela 2B: Resistência à compressão dos corpos de prova do traço de fck igual a 30 MPa com 2 d de idade. Fonte: Autor.

BLOCO I							TRAÇO		30 MPa
IDENTIFICAÇÃO	F		fci	fcm	Data de moldagem	Data do ensaio	IDADE: 2 d		
	[kg/f]	[N]							[MPa]
CP-I-30-B1	6700	65727	8,37	9,91	23/07/2017	Data do ensaio	25/07/2017		
CP-II-30-B1	9000	88290	11,25						
CP-III-30-B1	8100	79461	10,12						

Tabela 3B: Resistência à compressão dos corpos de prova do traço de fck igual a 15 MPa com 28 d de idade. Fonte: Autor.

BLOCO I		TRAÇO		15 MPa	
IDENTIFICAÇÃO	F		fci	fcm	Data de moldagem
	[kg/f]	[N]	[MPa]		
CP-IV-15-B1	16800	164808	20,99	21,29	Data do ensaio
CP-V-15-B1	14800	145188	18,50		22/08/2017
CP-VI-15-B1	19500	191295	24,37		IDADE: 28 d

Tabela 4B: Resistência à compressão dos corpos de prova do traço de fck igual a 30 MPa com 28 d de idade. Fonte: Autor.

BLOCO I		TRAÇO		30 MPa	
IDENTIFICAÇÃO	F		fci	fcm	Data de moldagem
	[kg/f]	[N]	[MPa]		
	21600	211896	26,99	27,83	Data do ensaio
	22400	219744	27,99		22/08/2017
22800	223668	28,49	IDADE: 28 d		

Tabela 5B: Resistência à compressão dos corpos de prova do traço de fck igual a 15 MPa com 28 d de idade. Fonte: Autor.

BLOCO II		TRAÇO		15 MPa	
IDENTIFICAÇÃO	F		fci	fcm	Data de moldagem
	[kg/f]	[N]	[MPa]		
	16600	162846	20,74	20,62	Data do ensaio
	15800	154998	19,74		15/02/2017
CP-III-15-B2	17100	167751	21,37		IDADE: 28 d

Tabela 6B: Resistência à compressão dos corpos de prova do traço de fck igual a 30 MPa com 28 d de idade. Fonte: Autor.

BLOCO II						TRAÇO	30 MPa
IDENTIFICAÇÃO	F		fci	fcm		Data de moldagem	
	[kg/f]	[N]	[MPa]				
	29400	288414	36,74	39,36		Data do ensaio	
	34000	333540	42,49			15/02/2017	
CP-III-30-B2	31100	305091	38,87			IDADE: 28 d	

Tabela 7B: Resistência à compressão dos corpos de prova do traço de fck igual a 15 MPa com 91 d de idade. Fonte: Autor.

BLOCO II				TRAÇO		15 MPa
IDENTIFICAÇÃO	F		fci	fcm	Data de moldagem	
	[kg/f]	[N]				
CP-IV-15-B2	12500	122625	15,62	15,20	16/01/2017	
CP-V-15-B2	12500	122625	15,62			
CP-VI-15-B2	11500	112815	14,37			

Tabela 8B: Resistência à compressão dos corpos de prova do traço de fck igual a 30 MPa com 91 d de idade. Fonte: Autor.

BLOCO II				TRAÇO		30 MPa
IDENTIFICAÇÃO	F		fci	fcm	Data de moldagem	
	[kg/f]	[N]				
CP-IV-30-B2	27650	271246,5	34,55	35,37	16/01/2017	Data do ensaio
CP-V-30-B2	27250	267322,5	34,05			
CP-VI-30-B2	30000	294300	37,49			

ANEXO C. TESTE DE REAÇÃO ÁLCALIS-AGREGADO

Se o resultado obtido neste ensaio indicar expansão menor que 0,19 % aos 30 dias, o agregado pode ser considerado potencialmente inócuo para uso em concreto segundo o fluxograma da Figura 2 na NBR 15577-1. Caso a expansão obtida no ensaio acelerado seja maior ou igual que 0,19 % aos 30 dias, o agregado é considerado potencialmente reativo nesse ensaio. A Figura 1C mostra as frações nas quais foram separados os agregados considerados. Para a dosagem da argamassa o material retido nas peneiras foi recombinado.



Figura 1C: Frações dos agregados retidas nas peneiras. Fonte: Autor.

Após 24 horas na cura úmida foi feita uma leitura inicial (Li). A leitura zero (L0) foi realizada após 24 horas em um banho térmico com água a 80 °C. Após a leitura zero, se efetuaram leituras nas idades de 16 dias (L16d) e 30 dias (L30d), contados a partir da moldagem. As leituras foram rápidas e os corpos de prova não passaram mais do que 10 minutos fora do recipiente. Foram feitas quatro leituras por cada barra de argamassa, uma leitura por face. A Tabela 1C resume a variação da expansão das barras moldadas com a areia utilizada na moldagem dos corpos de prova prismáticos na segunda etapa do programa experimental. Para cada cimento foram moldadas três barras.

Tabela 1C: Variação da expansão das barras moldadas com areia. Fonte: Autor.

Variação da expansão [%]		
Leituras	AREIA	
	CP-II-F-32	CP-V
L ₀	0,103	0,081
L _{16d}	-0,002	0,296
L _{30d}	0,002	0,012

A Tabela 2C resume a variação da expansão das barras moldadas com o pó de pedra, resultado da britagem da brita utilizada na moldagem dos corpos de prova prismáticos na segunda etapa do programa experimental.

Tabela 2C: Variação da expansão das barras moldadas com pó de pedra. Fonte: Autor.

Variação da expansão [%]		
Leituras	PÓ DE PEDRA	
	CP-II-F-32	CP-V
L ₀	0,032	0,023
L _{16d}	0,370	0,150
L _{30d}	0,180	0,213